



Imagerie ultrasonore par émission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion

Léonard Le Jeune

► To cite this version:

Léonard Le Jeune. Imagerie ultrasonore par émission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion. Acoustique [physics.class-ph]. Université Paris 7 Denis Diderot, 2016. Français. NNT: . tel-01321015

HAL Id: tel-01321015

<https://hal.science/tel-01321015>

Submitted on 24 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives| 4.0 International License

Thèse de doctorat

présentée par

Léonard LE JEUNE

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'université Paris-Diderot – Paris 7

École Doctorale 564 - Physique en Île-de-France

Spécialité Acoustique Physique

Imagerie ultrasonore par émission d'ondes planes pour le contrôle

de structures complexes en immersion

Soutenue le 15 février 2016

devant le jury composé de

M. Vincent GIBIAT	Professeur des Universités – Université Toulouse 3	Rapporteur
M. Mourad BENTAHAR	Maître de conférences – Université du Maine	Rapporteur
M. Quentin GRIMAL	Professeur des Universités – Université Paris 6	Examineur
M. Mathieu PERNOT	Chargé de recherche INSERM – Institut Langevin	Examineur
M. Olivier ROY	Directeur technique – M2M	Invité
M ^{me} Claire PRADA	Directrice de recherche CNRS – Institut Langevin	Directrice de thèse
M. Sébastien ROBERT	Ingénieur-chercheur – CEA-LIST	Encadrant CEA



Aita pe'a pe'a

Remerciements

Au cours de ces trois années de thèse, j'ai été amené à rencontrer et côtoyer un grand nombre de personnes, que ce soit professionnellement ou plus personnellement. Je souhaite ici les remercier, en présentant par avance mes excuses à ceux que j'aurais pu oublier.

Cette thèse s'est déroulée au CEA-LIST et plus particulièrement au sein du Département Imagerie et Simulation pour le Contrôle (DISC). Je remercie M^{me} Clarisse POIDEVIN, chef de ce service, de m'avoir accueilli. Les travaux ont été réalisés au Laboratoire d'Instrumentation et Capteurs (LIC) successivement dirigé par MM. Olivier CASULA et François CARTIER, que je remercie chaleureusement.

Je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury, MM. Quentin GRIMAL, Mathieu PERNOT, Olivier ROY, et plus spécialement MM. Vincent GIBIAT et Mourad BENTAHAR pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse.

J'adresse mes plus sincères remerciements à M^{me} Claire PRADA, ma directrice de thèse. Déjà 4 ans que nous travaillons ensemble, entre le stage sur les miroirs de Saint-Gobain et la thèse que tu as accepté d'encadrer. Je te remercie pour ta présence (très) régulière au cours de ces trois années. Ton enthousiasme à chaque réunion, quels que soient les résultats présentés m'ont permis d'avancer, même dans les moments plus difficiles.

Je tiens maintenant à remercier M. Sébastien ROBERT, mon encadrant au CEA, qui a suivi mes travaux au jour le jour. Sans toi, cette thèse n'aurait pas été ce qu'elle est (merci Captain Obvious). J'ai appris énormément à tes côtés, que ce soit au niveau théorique ou expérimental. Je te remercie également pour ton exigence dans tous les domaines (manips, rédaction...) qui, bien que parfois rageante, m'a permis de m'améliorer au cours de ces trois ans.

J'adresse un grand merci à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au cours de ces trois années au sein du département et en particulier aux personnes du LIC. Je vous remercie de m'avoir accueilli et intégré au sein du laboratoire et pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir sur (entre autres) :

- la démocratie (Julien, Vincent) ;
- les randos (Thomas) ;
- le MEDEF (David) ;
- Simple Human (Seb et tous les autres) ;
- et plein d'autres choses...

J'en arrive maintenant au gros morceau : les thésards, prestas, stagiaires. Je commence par Eduardo, mon co-bureau pendant 2 ans et demi, qui a toujours su me débloquer lorsque Matlab me jouait des tours. Ce fut un plaisir de partager ce bureau avec toi. Un grand merci à Blandine, pour les pauses inopinées et les discussions sur

L^AT_EXet TikZ. Je remercie également tous les thésards du département avec qui j'ai eu le plaisir de prendre des pauses et de déjeuner le mercredi. Je n'oublie pas non plus les prestas : Simon, Adrien, Michael. Enfin, merci aux membres de l'ODU (dont je vais enfin pouvoir faire partie officiellement, la consécration !) : Audrey, Blandine, Clémence, Marouane, Jason, Matthieu, Thomas, Antoine.

En dehors du CEA, je souhaiterais remercier ceux qui m'ont permis de décompresser lors de ces trois années :

- mes amis de la fac en France ou ailleurs (Romain et Amélie, Daniel, Meriem et Mathias, Nico et Véro, Josquin, Isa et Adri) ;
- les Enclumes (Xav, Philippe et tous les autres) ;
- les Rapetous (Comanche, Flo, Éliott, Cédric, Minico, Chonchon, Hugo et tous les autres).

Merci à vous tous de m'avoir supporté et d'avoir subi sans (trop) m'envoyer bouler.

Je souhaite maintenant remercier ma famille et mes proches. Merci à vous d'avoir été présents quand il le fallait, que ce soit avant ou pendant la thèse. Je termine en remerciant Audrey, pour tout.

Table des matières

Remerciements	i
Introduction	1
1 Généralités sur l'imagerie ultrasonore multiéléments	5
1 Les ultrasons	5
1.1 Définition	5
1.2 Ondes longitudinales, ondes transversales	6
1.3 Équation d'ondes	7
1.4 Géométrie des ondes	7
1.5 Énergie	8
1.6 Transmission et réflexion d'une onde ultrasonore	9
1.7 Atténuation	10
2 Les capteurs piézoélectriques	11
2.1 La piézoélectricité	12
2.2 Les capteurs multiéléments	12
2.3 Les capteurs au contact	13
2.4 Les capteurs en immersion	14
2.5 Directivité des éléments piézoélectriques	15
3 Caractéristiques d'un champ ultrasonore focalisé	19
3.1 Champ proche et champ lointain	20
3.2 Résolutions axiale, latérale et profondeur de champ	21
3.3 Modification des grandeurs caractéristiques d'un champ focalisé en présence d'une interface	22
4 Les méthodes d'imagerie multiéléments	24
4.1 Représentation des données ultrasonores	24
4.2 Imagerie B-Scan	25
4.3 Imagerie S-Scan	29
4.4 Imagerie multifocus	30
4.5 Imagerie Synthetic Transmit Aperture	31
5 Conclusion du chapitre	34
2 Développement d'une méthode d'imagerie rapide par émission d'ondes planes	37
1 Imagerie STA	37
1.1 Imagerie en mode direct	38
1.2 Imagerie en mode demi-bond	40

2	Imagerie PWI	42
2.1	Principe de l'imagerie PWI médicale	42
2.2	Généralisation de la méthode PWI pour le CND	44
3	Évaluation expérimentale de l'imagerie PWI	49
3.1	Dispositif expérimental	49
3.2	Évaluation de la méthode PWI pour un capteur au contact	50
3.3	Application de la méthode PWI pour un capteur en immersion	59
3.4	Imagerie PWI avec balayage mécanique	66
4	Conclusion du chapitre	74
3	Imagerie adaptative	75
1	Intérêt de l'imagerie adaptative	75
2	Comparaison des méthodes de mesure de surface	76
2.1	Description des méthodes	76
2.2	Comparaison des méthodes de mesure de surface	86
3	Imagerie STA adaptative	90
3.1	Optimisation de la mesure de surface par la méthode STA	90
3.2	Méthode de calcul des trajets à travers une surface complexe	94
3.3	Imagerie STA adaptative dans le matériau	97
3.4	Imagerie adaptative temps-réel dans un appareil industriel	102
4	Imagerie PWI adaptative	104
4.1	Généralisation de la méthode PWI pour des surfaces complexes	104
4.2	Méthode PWI adaptative	108
5	Conclusion du chapitre	111
	Conclusions et perspectives	113
	Bibliographie	115

Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) par ultrasons est répandu dans de nombreux domaines de l'industrie. On le retrouve notamment dans les secteurs de l'énergie (nucléaire, pétrole), du transport (automobile, aéronautique) ou encore de l'aérospatial. L'objectif du CND est d'assurer l'intégrité d'assemblages mécaniques, en détectant et caractérisant des défauts situés à l'intérieur ou en surface de ces structures. Depuis une vingtaine d'années, la technologie des capteurs multiéléments est de plus en plus utilisée dans les applications industrielles. Comparés aux traducteurs monoéléments, les multiéléments offrent une plus grande variété de contrôles, en proposant par exemple la possibilité de dévier le faisceau ultrasonore ou de le focaliser, et peuvent être exploités pour former des images sans déplacement du capteur (B-scans et S-Scan focalisés...). Ils participent surtout à l'amélioration des chaînes d'inspection, aussi bien en termes de rapidité, ce qui réduit les coûts de contrôle, que de qualité de contrôle, grâce à l'amélioration de la caractérisation des défauts. Les techniques multiéléments doivent répondre aux exigences de contrôle (précision, coût, rapidité) et s'adapter à la multiplicité et à la complexité des composants à inspecter. Ces composants peuvent présenter des géométries complexes, de l'anisotropie ou encore des hétérogénéités du matériau. Les contrôles peuvent être réalisés directement au contact de la structure, mais cette configuration limite la vitesse d'inspection et le contrôle de pièces présentant des surfaces irrégulières requiert le développement de sondes flexibles instrumentées relativement coûteuses. Les contrôles sans contact, avec de l'eau comme couplant entre le capteur et la structure inspectée (contrôles en immersion), permettent de pallier ces inconvénients. Cependant, comme pour les contrôles au contact, la présence de surfaces irrégulières impose une prise en compte de la géométrie de la structure pour adapter les lois focales et maintenir une bonne qualité d'image dans le matériau. Dans ce contexte, la thèse a pour but de proposer de nouvelles méthodes d'imagerie en immersion, fonctionnant en temps-réel, et s'adaptant aux évolutions de la surface complexe d'une structure irrégulière. Ces méthodes sont dites *adaptatives*.

Une des méthodes d'imagerie pouvant être appliquée en mode adaptatif est l'algorithme Synthetic Transmit Aperture (STA) aussi connu sous le nom de Total Focusing Method (TFM). C'est une généralisation de la méthode SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) aux capteurs multiéléments. L'intérêt principal de l'imagerie STA est que le contraste et la résolution spatiale sont optimaux dans toute la région imagée, donnant des images de grande qualité. Un autre avantage est la possibilité d'exploiter différents modes de propagation pour la reconstruction des images, en fonction de la nature des défauts recherchés. Cette méthode est déjà disponible en

temps-réel dans certains systèmes ultrasonores industriels, mais uniquement pour des configurations de contrôle au contact sur des surfaces planes.

Certes, la méthode STA fournit des images de meilleure qualité que l'échographie conventionnelle mais, en contrepartie, elle présente quelques inconvénients liés principalement au principe d'acquisition des signaux. La cadence d'imagerie est limitée par le nombre de transmissions à réaliser et par le nombre de signaux à stocker et à traiter. De plus, elle est très sensible au bruit électronique et à l'atténuation dans le matériau car chaque transmission est réalisée en excitant un seul élément du capteur. La méthode PWI (Plane Wave Imaging), développée dans le domaine de l'imagerie médicale, peut pallier ces inconvénients. Elle permet d'atteindre de très hautes cadences d'imagerie (jusqu'à plusieurs milliers d'images par seconde dans les scanners médicaux les plus modernes) grâce à la transmission d'un faible nombre d'ondes planes de fortes amplitudes. Cependant, elle n'est pas utilisable en l'état pour imager des pièces de géométries complexes ou lorsque l'on souhaite améliorer la caractérisation des défauts de type fissures avec des modes de propagation complexes.

Le chapitre 1 présente le contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse. Il introduit quelques notions de base sur les ondes ultrasonores, notamment la technologie des capteurs multiéléments utilisés lors des études expérimentales. Une étude de l'état de l'art des méthodes échographiques est réalisée et met en avant les avantages et les inconvénients des différentes méthodes. Cette étude permet de conclure que l'imagerie STA est celle possédant le plus grand potentiel en termes de détection et de caractérisation, malgré les quelques faiblesses citées plus haut.

Dans le chapitre 2, une méthode échographique alternative à l'imagerie STA est proposée pour réduire le volume de données à traiter et le nombre de tirs à réaliser. Elle combine les avantages de l'acquisition PWI (ondes transmises de fortes amplitudes, faible nombre de transmissions) avec ceux de l'imagerie STA (qualité d'image, reconstruction avec différents modes de propagation). Tout d'abord, les algorithmes STA et PWI sont présentés pour les modes de propagation direct et demi-bond. Ce chapitre présente ensuite une série de résultats expérimentaux permettant de comparer les performances des deux méthodes dans plusieurs situations. Le cas d'un capteur au contact d'une pièce plane permet de valider la méthode PWI dans un cas simple. Les deux méthodes sont ensuite appliquées en immersion, d'abord dans le cas simple d'un capteur fixe en mode direct et en mode demi-bond, puis dans le cas plus complexe d'un balayage mécanique associant ondes longitudinales et ondes de cisaillement pour imager simultanément plusieurs types de défauts.

Le chapitre 3 est dédié aux structures de surfaces complexes et présente deux méthodes adaptatives développées à partir des méthodes STA et PWI. La première étape d'une méthode adaptative est la mesure acoustique de la surface au-dessus de laquelle se trouve le capteur. Quatre méthodes de mesure de surface (Pulse-Echo, Pitch-Catch, SAUL et STA) sont donc détaillées et évaluées sur différentes géométries. Cette étude met en évidence que la méthode la plus adaptée à nos besoins est la mesure de surface par la méthode STA. Les deux méthodes adaptatives sont ensuite décrites et évaluées expérimentalement. La première consiste à appliquer deux fois l'algorithme STA au même volume de données pour imager la surface et en déduire sa

géométrie, puis imager les défauts sous la surface complexe. La méthode de mesure de surface par STA est optimisée pour réduire les temps de calcul et améliorer la qualité de l'image. Pour former l'image STA dans le matériau, un algorithme de calcul de trajets ultrasonores à travers une surface complexe est proposé. L'algorithme a été optimisé pour réaliser des traitements embarqués dans des systèmes industriels (un exemple de contrôle temps-réel avec la méthode STA adaptative est présentée dans ce chapitre). La seconde méthode adaptative est basée sur PWI. Le profil de la surface complexe est mesuré grâce à une première image PWI réalisée en immersion. Des lois de retards en transmission sont ensuite calculées pour engendrer des ondes planes sous la surface complexe mesurée. L'algorithme PWI est appliqué une seconde fois pour obtenir une image dans la pièce.

Chapitre 1

Généralités sur l'imagerie ultrasonore multiéléments

Le but de ce chapitre est de rappeler les principales méthodes d'imagerie utilisées en Contrôle Non Destructif (CND) par ultrasons. Pour rester concis, les méthodes se limiteront au contrôle par ondes de volume et au mode échographique où un seul capteur fonctionne alternativement en mode émission/réception. Dans la première section sont introduites quelques notions de base sur les ultrasons, comme les deux types d'ondes utilisées en imagerie, leur interaction avec une interface et leur atténuation dans un solide. Dans la deuxième section, les capteurs, leur principe de fonctionnement, ainsi que les deux principales configurations de contrôle rencontrées dans l'industrie, sont introduits. La troisième section aborde les caractéristiques d'un champ ultrasonore focalisé, telles que la résolution et la profondeur de champ. Enfin, la quatrième et dernière section présente les principales méthodes ultrasonores multiéléments. Cette présentation permet de mettre en évidence le potentiel de la méthode STA.

1 Les ultrasons

La première utilisation des ultrasons remonte à la Première Guerre mondiale lorsque Paul LANGEVIN créa en 1915 le premier générateur d'ultrasons, dans le but de détecter les sous-marins allemands. Ce fut l'invention du Sonar. Cependant, les ultrasons ne se sont démocratisés qu'à l'approche des années 50, notamment dans le domaine de l'imagerie médicale et du traitement thérapeutique. Depuis, les techniques de CND par ultrasons se sont progressivement répandues dans tous les secteurs de l'industrie (énergie, transports, sidérurgie, ...) pour contrôler la bonne santé de pièces sans altérer leurs propriétés mécaniques. Cette section a pour objectif de rappeler les notions principales de la propagation ultrasonore.

1.1 Définition

Les ultrasons sont des ondes mécaniques qui se propagent dans des milieux solides ou fluides. Ils sont situés dans une gamme de fréquences allant de 20 kHz à 1 GHz (cf. figure 1.1), inaudible à l'oreille humaine. Contrairement aux ondes électromagnétiques, les ondes ultrasonores ne peuvent se propager dans le vide puisqu'elles

nécessitent un déplacement de matière. Cependant, elles partagent certaines caractéristiques et peuvent être réfléchies, réfractées, atténuées, diffusées ou encore focalisées.



FIGURE 1.1 – Représentation de la gamme des sons en fonction de leur fréquence.

L'imagerie ultrasonore par ondes de volume exploite deux types d'ondes, les ondes longitudinales et transversales, dont les principales caractéristiques sont décrites dans la sous-section suivante.

1.2 Ondes longitudinales, ondes transversales

Le premier type d'ondes correspond à un déplacement particulaire parallèle à l'axe de propagation (cf. figure 1.2a). Ces ondes sont appelées ondes de compression, ou ondes longitudinales. Elles seront désignées dans ce manuscrit par l'abréviation « ondes L ».

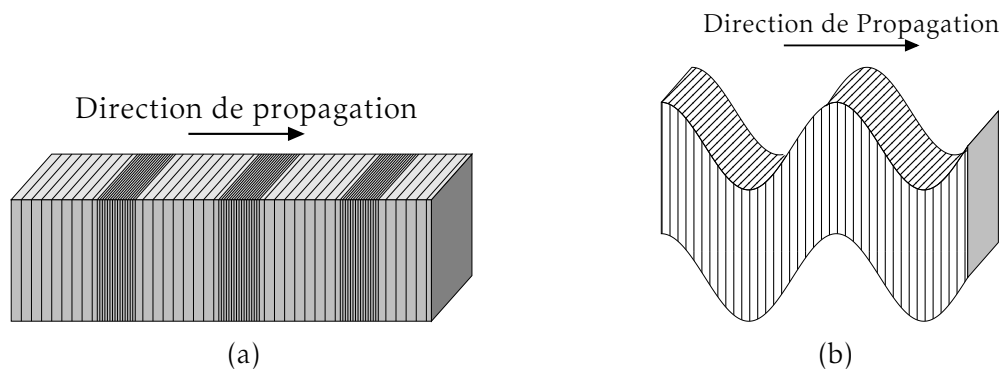


FIGURE 1.2 – Représentations du déplacement pour une onde : (a) longitudinale et (b) transversale.

Les ondes de cisaillement ou transversales, abrégées en « ondes T », correspondent à un déplacement particulaire dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation (cf. figure 1.2b). Dans les pièces métalliques, leur vitesse de propagation est à peu près égale à la moitié de la vitesse des ondes L. Elles sont également caractérisées par une plus forte atténuation et les capteurs utilisés pour les engendrer requièrent l'utilisation d'un sabot en réxolite (cf. sous-section 2.3).

Les ondes T sont les plus utilisées en CND car leur longueur d'onde est environ deux fois plus petite que celle des ondes L, et la caractérisation des défauts s'en trouve donc améliorée. Les ondes L sont plutôt employées pour effectuer de la mesure d'épaisseur (par exemple pour la caractérisation de corrosion), ou en présence d'acier inoxydable à gros grains ou de structures de fortes épaisseurs.

Deux autres grandeurs sont associées au déplacement particulaire : la vitesse de déplacement $\mathbf{v}_{L/T}(\mathbf{r}, t)$, qui est obtenue en dérivant le déplacement par rapport au temps et la pression acoustique notée $p(\mathbf{r}, t)$.

1.3 Équation d'ondes

L'équation de propagation d'un champ ultrasonore dans un solide isotrope est donnée par [1] :

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \cdot \mathbf{u} - \mu\nabla^2 \times \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}. \quad (1.1)$$

avec \mathbf{u} le déplacement particulaire, ρ la masse volumique du milieu et λ et μ les coefficients de LAMÉ du solide isotrope. La vitesse de propagation des ondes L et T dans le solide est donnée respectivement par les relations $v_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ et $v_T = \sqrt{\mu/\rho}$. Il existe une multitude de solutions à cette équation, cependant on ne s'intéresse ici qu'aux deux solutions rencontrées lors de cette thèse. Ces deux solutions décrivent deux géométries d'onde : les ondes planes et cylindriques.

1.4 Géométrie des ondes

La solution la plus simple est de considérer une onde se propageant dans une seule des trois directions spatiales et d'extension infinie dans les deux autres. Dans ce cas, l'onde est dite plane (cf. figure 1.3a). L'expression d'une onde plane progressive (c'est-à-dire se déplaçant dans le sens des x croissants) en régime monochromatique est donnée par :

$$p(x, t) = A_0 \exp(j(kx - \omega t)), \quad (1.2)$$

où A_0 représente l'amplitude de l'onde plane à la source, k est le nombre d'onde ($k = 2\pi/\lambda$) et ω est la pulsation de l'onde ($\omega = kc$, en rad.s^{-1}). Une particularité des ondes planes est que leur amplitude ne décroît pas avec la distance à la source, si le milieu de propagation est dépourvu de dissipation visco-élastique.

Si l'on considère une source linéique selon l'axe Oz, l'onde émise est alors cylindrique (cf. figure 1.3b). Elle se propage de manière isotrope dans le plan xOz , et ne dépend que du temps de propagation t et de la distance $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ à la source. Son expression prend la forme :

$$p(r, t) = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \exp(j(\omega t - kr)), \quad (1.3)$$

où l'on observe que, à la différence de l'onde plane dont l'amplitude reste constante au fil de sa propagation, l'amplitude de l'onde cylindrique décroît en $1/\sqrt{r}$.

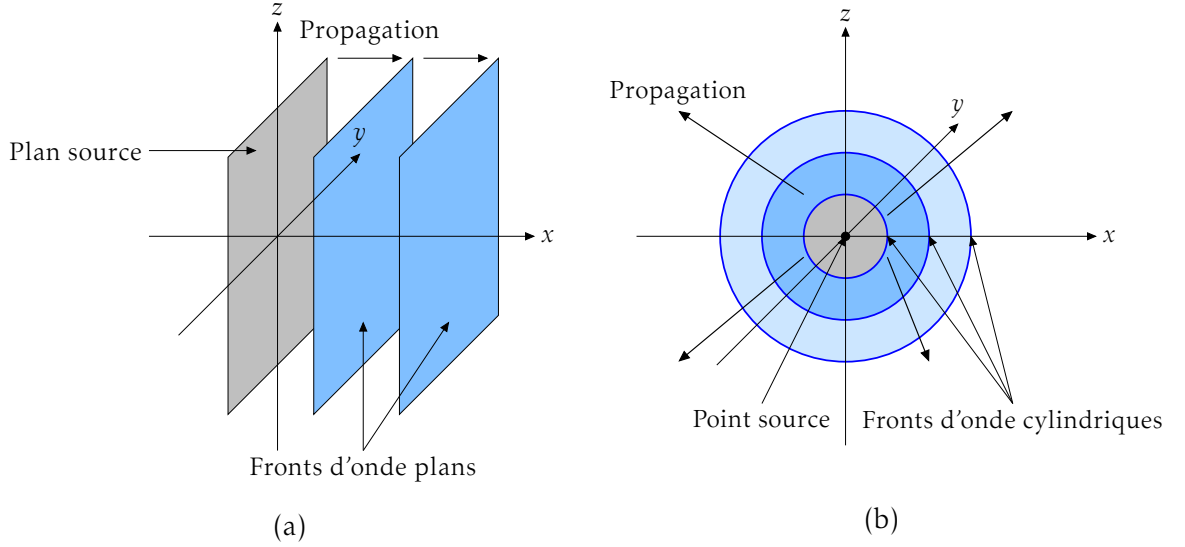


FIGURE 1.3 – Géométrie des ondes : (a) onde plane progressive et (b) onde cylindrique.

1.5 Énergie

La puissance instantanée fournie par la déformation d'un volume élémentaire est donnée par [1, 2] :

$$\frac{dw}{dt} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \frac{\partial u_i}{\partial t} - T_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial t}, \quad (1.4)$$

où u_i est le déplacement particulière dans la direction i et T_{ij} est le tenseur des contraintes. Comme ce tenseur est symétrique, le second terme est équivalent à la partie symétrique du gradient des déplacements, c'est-à-dire la déformation S_{ij} , avec $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$. L'équation 1.4 s'écrit alors :

$$\frac{dw}{dt} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \frac{\partial u_i}{\partial t} - T_{ij} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1.5)$$

où le premier terme représente la dérivée par rapport au temps de l'énergie cinétique (E_c), alors que le second terme exprime la dérivée temporelle de l'énergie potentielle (E_p). La loi de conservation de l'énergie s'écrit donc comme :

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt} (E_c + E_p), \quad (1.6)$$

avec, dans le cas d'un solide isotrope, E_p exprimée par :

$$E_p = \frac{1}{2} c_{ijkl} S_{ij} S_{kl}. \quad (1.7)$$

1.6 Transmission et réflexion d'une onde ultrasonore

Un cas souvent rencontré en CND est celui d'une interface liquide/solide (cf. figure 1.4), où l'onde incidente u_I , présentant un angle d'incidence θ_I , se propage dans l'eau en direction du solide. À l'interface, elle donne naissance à trois ondes qui se propagent de chaque côté de celle-ci. Dans l'eau, une onde u_R est réfléchiée sous un angle θ_R . Dans le solide, deux ondes sont transmises : une onde longitudinale u_L et une onde transversale u_T . Les angles de réflexion (θ_R) et de transmission (θ_L et θ_T) obéissent à la loi de SNELL-DESCARTES de l'optique géométrique :

$$\frac{\sin \theta_I}{v} = \frac{\sin \theta_L}{v_L} = \frac{\sin \theta_T}{v_T} = \frac{\sin \theta_R}{v}. \quad (1.8)$$

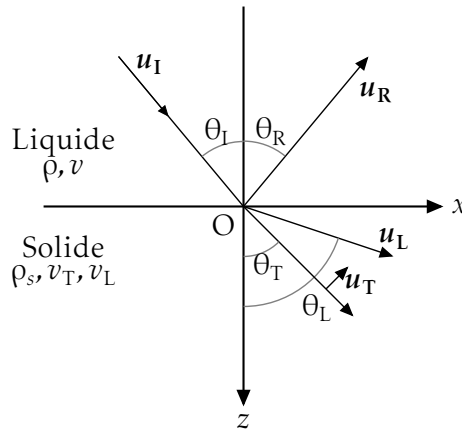


FIGURE 1.4 – Réflexion et réfraction à l'interface liquide/solide isotrope.

L'amplitude de l'onde réfléchiée dépend du coefficient de réflexion r et celles des deux ondes L et T transmises dépendent des coefficients de transmission, respectivement notés t_{LL} et t_{LT} . Les conditions aux limites imposent la continuité de la composante normale du déplacement et de la contrainte normale ainsi que la nullité des contraintes tangentielles. Les coefficients de réflexion et de transmissions sont alors donnés par [3] :

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{v^2 \sin 2\theta_T \sin 2\theta_L + \cos^2 2\theta_T - \frac{Z \cos \theta_L}{Z_L \cos \theta_I}}{v^2 \sin 2\theta_T \sin 2\theta_L + \cos^2 2\theta_T + \frac{Z \cos \theta_L}{Z_L \cos \theta_I}} \\ t_{LT} = -2 \frac{ZZ_T \sin 2\theta_L}{Z_L^2 N + R} \\ t_{LL} = 2 \frac{Z \cos 2\theta_T}{Z_L N + R} \end{array} \right. , \quad (1.9)$$

où $Z = \rho v$ est l'impédance acoustique du liquide et où $Z_L = \rho_s v_L$ et $Z_T = \rho_s v_T$ sont les impédances acoustiques du solide pour les ondes L et T. De plus :

$$\begin{cases} v &= \frac{v_T}{v_L} \\ N &= \gamma^2 \sin 2\theta_T \sin 2\theta_L + \cos^2 2\theta_T \\ R &= \frac{Z \cos \theta_L}{Z_L \cos \theta_I} \end{cases} \quad (1.10)$$

La figure 1.5 donne l'évolution des coefficients de réflexion et de transmission en fonction de l'angle d'incidence θ_I dans le cas d'une interface entre de l'eau ($v \approx 1483 \text{ m.s}^{-1}$) et de l'acier ($v_L \approx 5740 \text{ m.s}^{-1}$ et $v_T \approx 3100 \text{ m.s}^{-1}$). Le coefficient r varie peu lorsque θ_i augmente jusqu'à l'angle critique $\theta_c = 13,6^\circ$ ($\theta_L = 90^\circ$). À cette valeur, le coefficient de transmission en ondes T s'annule. Au-delà, l'onde longitudinale transmise est évanescence et le coefficient de transmission en onde T croît. L'angle critique de transmission des ondes T est atteint pour $\theta_c \approx 28^\circ$ et l'onde incidente est alors totalement réfléchi.

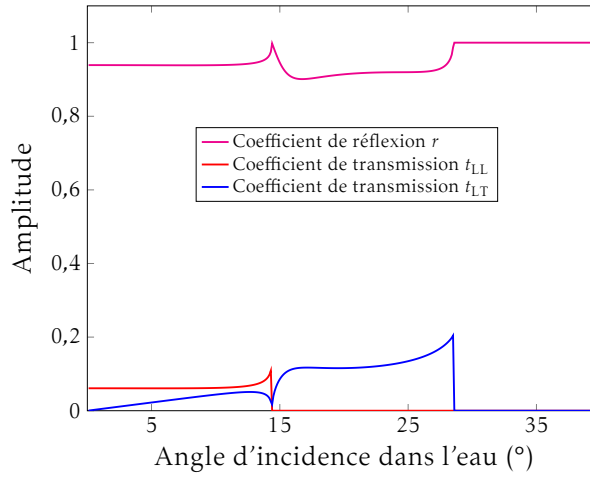


FIGURE 1.5 – Coefficients de réflexion $|r_{LL}|$ (—), de transmission $|t_{LT}|$ (—) et de transmission $|t_{LL}|$ (—) pour une interface eau/acier.

1.7 Atténuation

L'atténuation d'une onde ultrasonore dans un matériau correspond à une diminution de son amplitude au cours de sa propagation. Expérimentalement, cette décroissance peut être observée en enregistrant par exemple, les échos successifs du fond de pièce (cf. figure 1.6).

Si l'étalement géométrique de l'onde est négligeable (cf. sous-section 1.3) et si l'on néglige les coefficients de réflexion (cf. équation 1.9 et figure 1.5), les maxima des échos successifs suivent une décroissance exponentielle de la forme [4] :

$$A(z) = A_0 \exp(-\alpha z), \quad (1.11)$$

où $A(z)$ est l'amplitude de l'onde atténuée à la profondeur z , A_0 correspond à l'amplitude de l'onde à l'entrée de la pièce ($z = 0$) et α est le coefficient d'atténuation qui, en général, dépend de la fréquence. L'atténuation est causée par deux mécanismes distincts, l'absorption et la diffusion. L'absorption est le processus par lequel l'énergie vibratoire de l'onde ultrasonore est transmise au milieu de propagation et est dissipée sous forme de chaleur. La diffusion correspond à l'interaction de l'onde avec des diffuseurs de taille équivalente à la longueur d'onde, et se traduit par la génération de bruit de structure plus ou moins important. L'atténuation est proportionnelle à la fréquence de l'onde, ce qui implique que plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation est forte. Elle peut être mesurée expérimentalement en enregistrant les échos successifs du fond de pièce et est donnée par la relation :

$$\alpha = \frac{10}{ne} \log \left(\frac{A_1}{A_n} \right), \quad (1.12)$$

où e est l'épaisseur de la pièce, n le nombre d'allers et retours entre le capteur et le fond et A_1 et A_n sont les amplitudes du premier et du n ème écho de fond. Pour une fréquence donnée, elle s'exprime en dB.mm^{-1} ou en Np.m^{-1} .

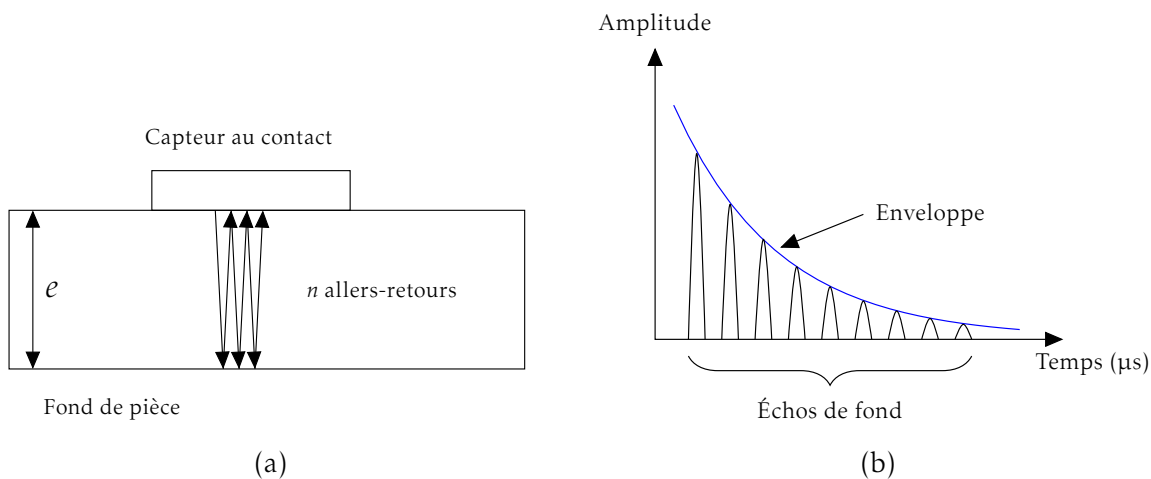


FIGURE 1.6 – Mesure de l'atténuation d'une onde ultrasonore. (a) Enregistrement au contact des échos du fond de pièce et (b) décroissance exponentielle des échos successifs provenant du fond de pièce.

2 Les capteurs piézoélectriques

Il existe différents moyens de génération d'ondes élastiques. Dans le domaine des ultrasons, l'émission et la réception reposent majoritairement sur l'utilisation d'éléments piézoélectriques [5]. Cette section présente les capteurs piézoélectriques multiéléments et leur principe de fonctionnement. Dans un premier temps, le principe de génération d'ondes à l'aide de transducteurs piézoélectriques est exposé, puis deux types de capteurs

multiéléments sont présentés : les capteurs au contact et les capteurs en immersion. Dans un second temps, la directivité d'un élément piézoélectrique est donnée dans le cas d'un milieu fluide, puis dans un milieu solide.

2.1 La piézoélectricité

L'effet piézoélectrique, découvert en 1880 par les frères CURIE [6], repose sur la conversion d'une énergie électrique en énergie mécanique, et inversement. Lorsqu'un cristal piézoélectrique est traversé par un courant électrique, il se contracte dans la direction du courant et revient à sa position d'origine lorsque le courant cesse. C'est cette caractéristique qui est utilisée afin de produire des ultrasons. Des impulsions électriques sont émises à la fréquence de résonance de l'élément piézoélectrique de manière à obtenir la plus grande amplitude de vibration de sa surface. Une onde de pression est alors émise dans le matériau au contact de l'élément. Inversement, si l'élément piézoélectrique subit une contrainte due à une onde mécanique, il se déforme et engendre un courant électrique. C'est cet effet qui est utilisé pour recevoir des signaux ultrasonores. Ainsi, il est possible avec un même transducteur d'émettre et de recevoir des ultrasons, et de réaliser de l'imagerie échographique.

2.2 Les capteurs multiéléments

Les capteurs ultrasonores peuvent être constitués d'un (monoélément) ou de plusieurs (multiéléments) éléments piézoélectriques. Le cas le plus simple est celui d'un capteur monoélément de forme cylindrique, représenté sur la figure 1.7. Dans la plupart des transducteurs, les éléments piézoélectriques sont fabriqués en céramique PZT (Plomb, Zirconate, Titane).

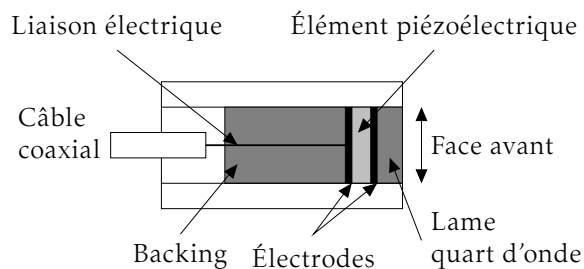


FIGURE 1.7 – Coupe et différentes parties d'un transducteur monoélément.

Les transducteurs multiéléments sont composés de plusieurs éléments piézoélectriques et sont couramment utilisés dans le domaine médical depuis les années 70. Leur découpe dépend de l'application visée ; elle peut être linéaire, matricielle ou présenter des formes plus originales (cf. figure 1.8). L'utilisation de capteurs multiéléments permet une plus grande variété de contrôles. Un réseau linéaire permet, par exemple, la déviation du faisceau ultrasonore dans le plan du capteur (application : imagerie 2D) alors qu'un réseau matriciel permettra une déviation dans toutes les directions

(application : imagerie 3D). Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés à l'aide de capteurs multiéléments linéaires, les plus couramment utilisés en CND.

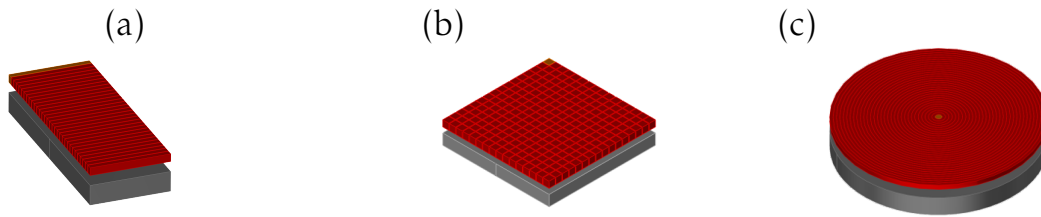


FIGURE 1.8 – Différents types de découpages multiéléments : (a) linéaire, (b) matriciel et (c) annulaire.

2.3 Les capteurs au contact

Les capteurs multiéléments classiques peuvent être utilisés directement au contact de la pièce si la surface de celle-ci est plane et que la zone d'intérêt se trouve sous l'ouverture du capteur ou, autrement dit, lorsque l'image à calculer est centrée sur l'axe central du capteur. Lorsque la zone image est excentrée et éloignée de l'axe central du capteur, la possibilité de réaliser des images est contrainte par la directivité des éléments. On utilise alors un sabot incliné monté sous le capteur qui, grâce à la réfraction à l'interface sabot/pièce, permet d'améliorer la déviation du faisceau ultrasonore (cf. figure 1.9a). Les sabots inclinés sont aussi très souvent employés pour focaliser des ondes T. Ce type de contrôle au contact est adapté à des pièces de géométries planes ou cylindriques présentant un rayon de courbure grand par rapport à la dimension latérale du sabot.

Cependant, les pièces inspectées en industrie comportent souvent des géométries irrégulières dont les courbures ne sont pas négligeables et peuvent altérer significativement la qualité du contrôle. Dans cette situation, le couplage acoustique entre le capteur et la pièce n'est plus assuré et les lois de retards calculées pour focaliser dans la pièce ne sont pas adaptées à la géométrie. Cela se traduit par l'impossibilité de contrôler la déviation du faisceau et par une diminution de l'amplitude des signaux. Pour optimiser le contrôle au contact de pièces complexes, le CEA développe des capteurs multiéléments souples qui permettent de s'adapter à la surface de la pièce [7] (cf. figures 1.9b et 1.9c). Le capteur conformable intelligent (TCI [8]) a été conçu afin de contrôler des pièces complexes 2D présentant des rayons de courbure de l'ordre de 15 mm (cf. figure 1.9b). Il est composé d'éléments piézoélectriques indépendants formant une face avant flexible. Pour contrôler les caractéristiques du faisceau ultrasonore (déviation, profondeur de focalisation) lors d'un déplacement au-dessus d'une surface complexe, il est nécessaire de compenser les effets de celle-ci en prenant en compte la déformation du capteur dans le calcul de la loi focale. Pour cela, le TCI est équipé d'un profilomètre qui lui permet de mesurer en temps réel la déformation de la surface émettrice. Un algorithme embarqué dans le système d'acquisition adapte alors les lois

focales en fonction de la déformation mesurée. De cette manière, les caractéristiques des faisceaux restent quasi identiques, quelle que soit la position du capteur.

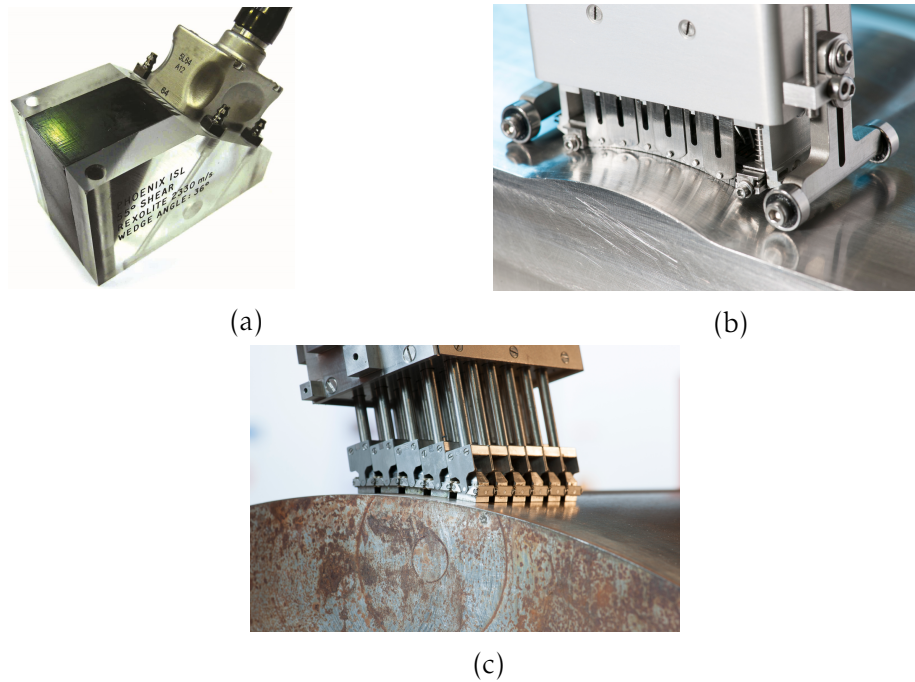


FIGURE 1.9 – Contrôles au contact : capteurs (a) avec sabot (b) conformable 1D et (c) conformable 2D.

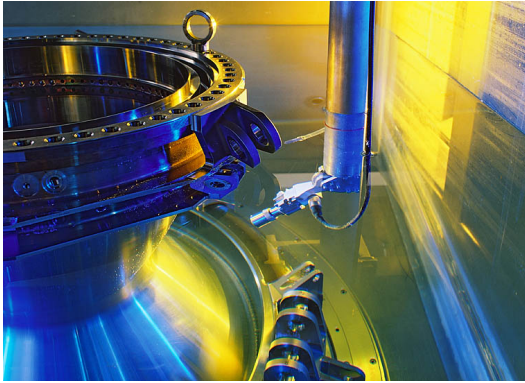
2.4 Les capteurs en immersion

Les contrôles peuvent également être réalisés sans contact, en immersion, c'est-à-dire que le capteur et la pièce sont plongés dans un liquide (de l'eau, le plus souvent) servant de milieu couplant (cf. figure 1.10a). Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux contrôles au contact, parmi lesquels :

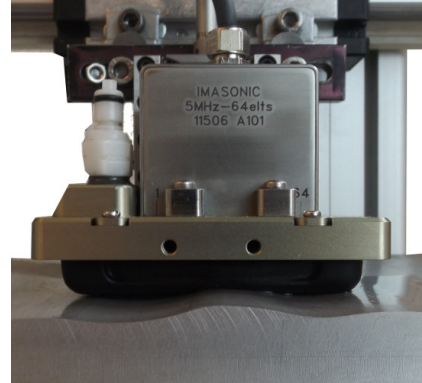
- la possibilité de contrôler des pièces complexes avec des capteurs traditionnels, moins coûteux que les traducteurs conformables ;
- une vitesse d'inspection plus importante, grâce à l'absence de frottements ;
- une meilleure détection des défauts proches de la surface ;
- la possibilité d'incliner le capteur pour privilégier un angle d'inspection sous une surface complexe (un capteur conformable ne peut pas être utilisé avec un sabot).

Cependant, ces techniques peuvent être contraignantes, notamment dans le cas d'un contrôle de maintenance (c'est-à-dire pour une structure ou une machine montée). En effet, il est alors nécessaire de démonter la partie de la structure à inspecter, ce qui n'est pas forcément possible suivant le type de structure (circuit primaire de centrale nucléaire, coque de bateau...), et les coûts engendrés. Pour pallier ces inconvénients, une nouvelle solution, dite en « immersion locale » est développée par la société

Imasonic (cf. figure 1.10b). Une membrane souple remplie d'eau assure le couplage entre le capteur et la pièce. Ils permettent donc de réaliser des contrôles de type immersion, sans avoir à plonger la pièce dans l'eau.



(a)



(b)

FIGURE 1.10 – Contrôles : (a) en immersion totale dans une cuve (©Airbus) et (b) en immersion locale à l'aide d'un capteur muni d'un sabot souple rempli d'eau.

2.5 Directivité des éléments piézoélectriques

Les dimensions d'un élément piézoélectrique font que celui-ci ne rayonne pas de façon omnidirectionnelle dans le milieu environnant mais avec une certaine directivité.

2.5.1 Directivité dans l'eau

Pour un élément rectangulaire d'un réseau linéaire émettant dans l'eau, la pression en un point $P(\mathbf{r})$ est donnée par l'équation de HELMOLTZ-KIRCHHOFF [9] :

$$P(\mathbf{r}) = \int_{S=S_0+S_h} \left[g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) \frac{\partial P(\mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{n}} - p(\mathbf{r}_0) \frac{g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{r}_0} \right] dS(\mathbf{r}_0), \quad (1.13)$$

où $g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)$ est la fonction de GREEN donnée par :

$$g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) = -\frac{\exp(-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}. \quad (1.14)$$

Dans ces équations, les vecteurs \mathbf{r} et \mathbf{r}_0 donnent les positions des points P et M_0 par rapport à la source de surface S_0 , S_h est une surface fermée théorique, \mathbf{n} est un vecteur unitaire normal à la surface S_0 et qui pointe vers le point P et $dS(\mathbf{r}_0)$ est un élément de surface (cf. figure 1.11).

Dans l'hypothèse d'un baffle souple (c'est-à-dire un traducteur immergé dans l'eau), la pression s'annule en dehors de la surface de l'élément. La fonction de GREEN g -ainsi définie est :

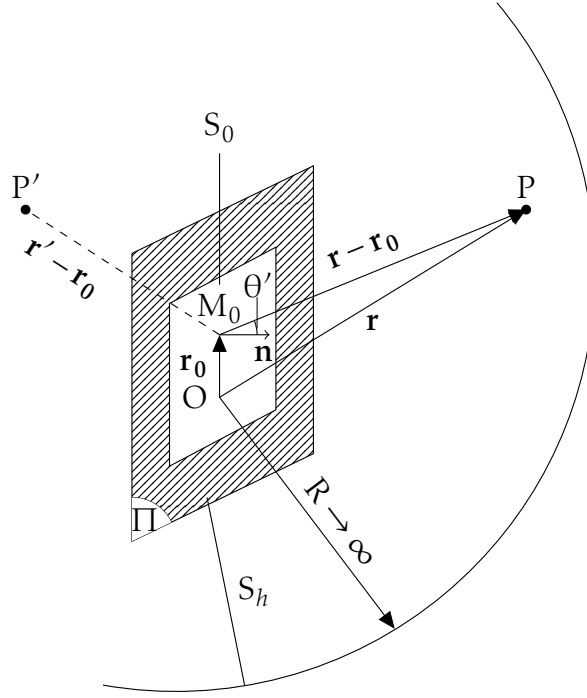


FIGURE 1.11 – Domaine d'intégration de l'équation 1.13 avec une source dans le plan Π .

$$g_-(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) - g(\mathbf{r}|\mathbf{r}'_0). \quad (1.15)$$

Si \mathbf{r} appartient au plan Π alors $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0|$ (P' est le symétrique de P par rapport au plan de la source) et l'équation 1.15 s'écrit :

$$\begin{cases} g_-(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = 0 \\ \frac{\partial g_-(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0)}{\partial n(\mathbf{r}_0)} = 2jk g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \end{cases}. \quad (1.16)$$

En remplaçant l'équation 1.16 dans l'équation 1.13, cette dernière s'écrit alors :

$$P(\mathbf{r}) = 2jk \int_S g(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) P(\mathbf{r}_0) \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r} - \mathbf{r}_0) dS(\mathbf{r}_0), \quad (1.17)$$

avec θ' l'angle entre $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ et \mathbf{n} . La contribution de S_h ne peut être négligée que lorsque la pression s'annule, ce qui est le cas dans la condition de baffle souple, l'intégration se fait alors uniquement sur la surface active S_0 :

$$P(\mathbf{r}) = \frac{jk}{2\pi} \int_{S_0} P(\mathbf{r}_0) \frac{e^{jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \cos \theta' dS(\mathbf{r}_0). \quad (1.18)$$

De plus, si la pression est uniforme sur la surface active :

$$P(\mathbf{r}) = \frac{jkP_0}{2\pi} \int_{S_0} \frac{e^{jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} \cos \theta' dS(\mathbf{r}_0). \quad (1.19)$$

Si l'on considère que la dimension de la surface active suivant l'axe y est grande devant celle suivant l'axe x , l'intégration se fait sur la largeur a de l'élément (cf. figure 1.12). De plus, en champ lointain, on peut considérer que $\theta \approx \theta'$ et $\mathbf{r} \approx |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$, la résolution de l'équation 1.19 donne alors le coefficient de directivité, qui s'exprime [10] :

$$D(\theta) = \frac{\sin(k \frac{a}{2} \sin \theta)}{k \frac{a}{2} \sin \theta} \cos \theta. \quad (1.20)$$

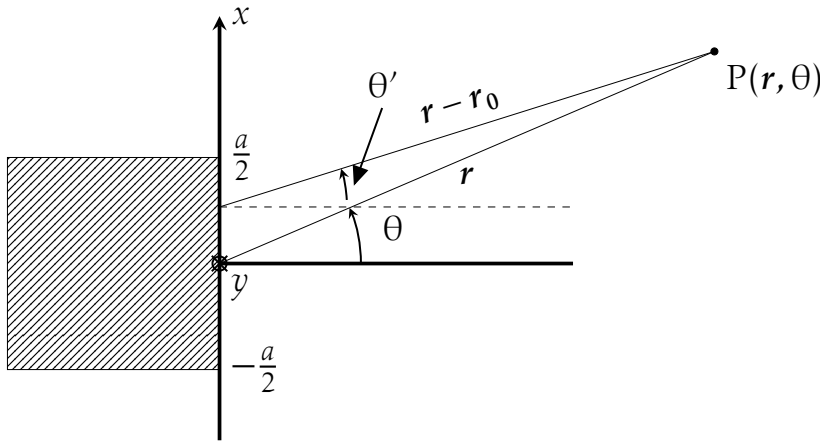


FIGURE 1.12 – Représentation d'un élément piézoélectrique rayonnant dans l'eau.

2.5.2 Directivité dans un solide

La directivité des ondes L et T dans un solide est plus complexe à calculer car un terme de couplage entre ces deux ondes intervient dans le calcul. L'équation d'ondes dans un solide isotrope est donnée par l'équation 1.1, qui peut également s'écrire en fonction des constantes élastiques de compression c_{11} et de cisaillement c_{44} [11] :

$$c_{11} \nabla^2 \cdot \mathbf{u} - c_{44} \nabla^2 \times \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (1.21)$$

Le calcul des directivités consiste à exprimer les contraintes normales (T_{zz}) et tangentielles (T_{xz}) en fonction des déplacements particuliers u_x et u_z dans un solide isotrope. Les contraintes sont données par :

$$\begin{cases} T_{zz} = (c_{11} - 2c_{44})\Delta + 2c_{44} \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ T_{xz} = c_{44} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \end{cases}, \quad (1.22)$$

avec $\Delta = \nabla \cdot \mathbf{u}$. En posant $W = \nabla \times \mathbf{u}$, les déplacements particuliers s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} + \left(\omega \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}}} \right)^2 \Delta = 0 \\ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \left(\omega \sqrt{\frac{\rho}{c_{44}}} \right)^2 \Delta = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

Les contraintes s'expriment alors comme :

$$\begin{cases} \frac{\rho \omega^2}{c_{44}^2} T_{zz} = 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} - \frac{c_{11}}{c_{44}} \left(\frac{c_{11}}{c_{44}} - 2 \right) \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} - \left(\frac{c_{11}}{c_{44}} \right)^2 \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} \\ \frac{\rho \omega^2}{c_{44}^2} T_{xz} = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} - 2 \frac{c_{11}}{c_{44}} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x \partial z} \end{cases} \quad (1.24)$$

En appliquant une transformée de FOURIER spatiale à ces équations et en considérant les conditions de continuité à l'interface pour un élément imposant une contrainte normale à la surface (c'est-à-dire $T_{zz} = 1$ si $|x| < a$, $T_{zz} = 0$ si $|x| > a$ et $T_{xz} = 0$ pour tout a), il est possible d'obtenir une expression des déplacements particuliers mettant en évidence la directivité du traducteur. MILLER et PURSEY ont exprimé ces coefficients de directivité sous la forme [11] :

$$\begin{cases} D_L(\theta) = \frac{k_L^4 \cos \theta (\gamma^2 - 2 \sin^2(\theta)) \sin(k_L \frac{a}{2} \sin \theta)}{G(k_L \sin \theta) k_L \frac{a}{2} \sin \theta} \cos \theta \\ D_T(\theta) = \frac{ik_T^4 \sin 2\theta \sqrt{\sin^2 \theta - \gamma^2} \sin(k_T \frac{a}{2} \sin \theta)}{G(k_T \sin \theta) k_T \frac{a}{2} \sin \theta} \cos \theta \end{cases}, \quad (1.25)$$

avec $\gamma = v_L/v_T$ et $G(x) = (2x^2 - k_T^2)^2 - 4x^2 \sqrt{x^2 - k_L^2} \sqrt{x^2 - k_T^2}$.

La figure 1.13 donne un exemple de diagramme de rayonnement pour un élément de 0,55 mm, fonctionnant à 2 MHz. La directivité des ondes dans l'eau (cf. figure 1.13a) et celle des ondes L dans l'acier (cf. figure 1.13b) montrent que l'élément émet principalement dans l'axe. Ceci implique que les contrôles utilisant des ondes L doivent se faire préférentiellement dans l'axe du capteur, à moins de monter le capteur sur un sabot incliné pour forcer un rayonnement hors axe. Le diagramme de rayonnement des ondes T est très différent (cf. figure 1.13c). On constate que l'amplitude dans l'axe du capteur est nulle alors qu'elle est maximale aux environs de 40°. Cette particularité est intéressante pour la détection de défauts hors axe et lorsqu'un sabot en réxolite ne peut être utilisé (par exemple dans le cas d'une surface complexe).

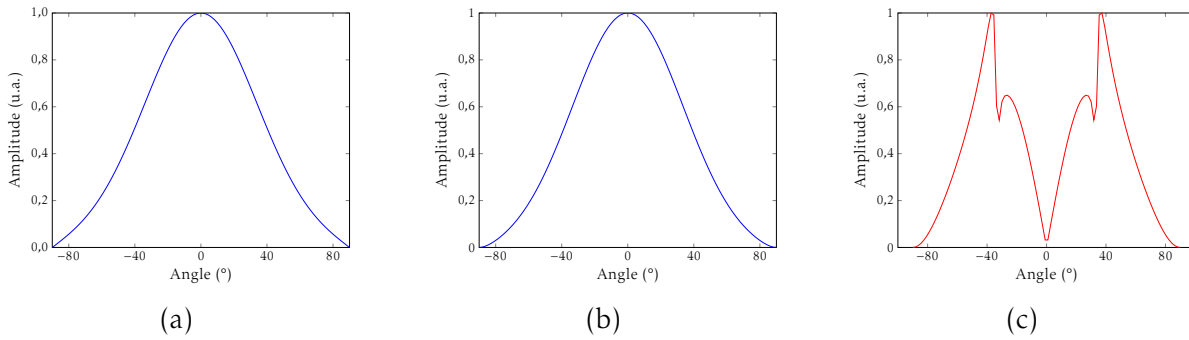


FIGURE 1.13 – Diagramme de directivité d'un élément piézoélectrique de 0,55 mm à 2 MHz. (a) Directivité dans l'eau, (b) directivité des ondes L et (c) des ondes T dans l'acier.

3 Caractéristiques d'un champ ultrasonore focalisé

La focalisation est le fait de concentrer l'énergie transmise par le capteur en un point du milieu considéré. Une onde ultrasonore peut être focalisée dans différentes directions dans le plan d'incidence d'un capteur multiéléments. Focaliser les ultrasons à la profondeur supposée des défauts maximise l'amplitude des échos tandis qu'une déviation permet d'inspecter le matériau en dehors de l'axe du capteur. On peut focaliser au moyen d'une lentille, d'une mise en forme de la surface émettrice du capteur, ou bien à l'aide de capteurs multiéléments, en appliquant un retard à l'émission à chaque élément en fonction de sa distance par rapport au point de focalisation (cf. figure 1.14).

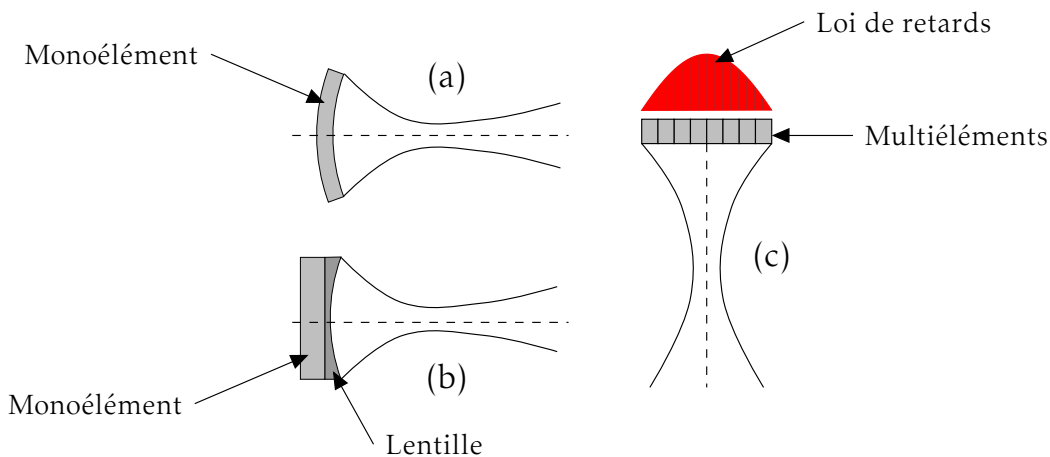


FIGURE 1.14 – Exemples de focalisation avec : (a) un capteur monoélément mis en forme, (b) un capteur doté d'une lentille acoustique et (c) un traducteur multiéléments avec une loi de retards.

Cette section présente les grandeurs caractéristiques d'un champ focalisé (cf. figure 1.16). Dans un premier temps, les différentes zones composant le champ ultrasonore sont détaillées. Puis, les grandeurs caractéristiques de la focalisation (résolutions, profondeur de champ) sont introduites.

3.1 Champ proche et champ lointain

Un transducteur ultrasonore non focalisé engendre un champ qui peut être séparé en deux zones bien distinctes (cf. figure 1.15).

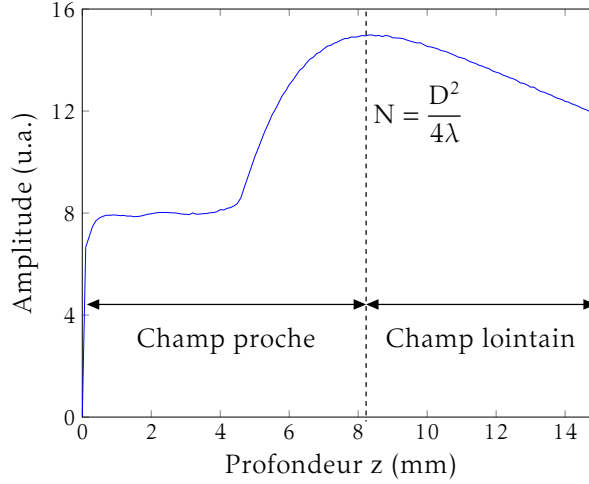


FIGURE 1.15 – Amplitude du champ relevée le long de l'axe d'un transducteur circulaire de rayon 5 mm, de fréquence centrale 2 MHz rayonnant dans l'eau. Dans cette configuration, la distance de FRESNEL N vaut environ 8,3 mm.

La zone proche du capteur est appelée « zone de champ proche » (ou zone de FRESNEL), et s'étend jusqu'à la distance de FRESNEL notée N. Pour un élément circulaire, N a pour expression :

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (1.26)$$

où D est le diamètre du capteur et λ la longueur d'onde à la fréquence centrale du capteur. Pour un élément rectangulaire, l'équation est similaire mais il est nécessaire d'appliquer un facteur correctif K_a [12] :

$$N = K_a \frac{L^2}{4\lambda}, \quad (1.27)$$

où L est la plus grande dimension de l'élément. Le facteur K_a dépend du rapport entre la largeur et la longueur de l'élément, et varie entre 1 et 1,4 pour un ratio allant de 0 à 1. Les capteurs utilisés au cours de cette thèse présentent des ratios autour de 0,2, le facteur de correction est alors presque égal 1.

Au-delà de la distance de champ proche se situe la « zone de champ lointain » (ou zone de FRAUNHOFER). Ces deux zones se distinguent par un comportement différent du faisceau ultrasonore. Dans la zone de champ proche ($z < N$), la largeur du faisceau reste à peu près constante et l'amplitude du champ varie fortement jusqu'à atteindre son amplitude maximale en $z = N$. Il s'agit de la focalisation naturelle du transducteur au-delà de laquelle il n'est plus possible de forcer une focalisation par le biais de lois de retards. Dans la zone de champ lointain ($z > N$), le faisceau diverge et l'amplitude du champ décroît jusqu'à zéro du fait de l'étalement spatial de l'onde.

Il est à noter qu'en CND, le contrôle est réalisé en champ proche dans 90 % des cas, exception faite des capteurs matriciels dont l'ouverture est en général plus faible.

3.2 Résolutions axiale, latérale et profondeur de champ

En imagerie ultrasonore, la qualité de la focalisation repose sur trois critères principaux : la résolution axiale (le long de l'axe de propagation), la résolution latérale (normale à l'axe de propagation) et la profondeur de champ. Pour un milieu donné, ils dépendent des caractéristiques du capteur (fréquence et ouverture) et de la profondeur de focalisation.

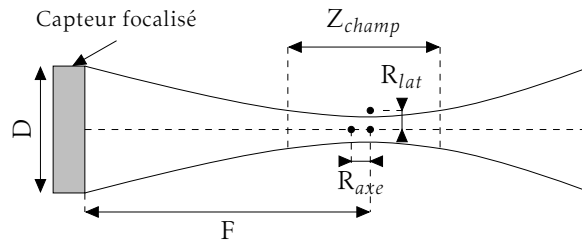


FIGURE 1.16 – Grandeurs caractéristiques d'une focalisation.

Résolution axiale : La résolution axiale R_{axe} , ou résolution temporelle, est la capacité à séparer deux points situés sur l'axe de propagation. Elle dépend de la longueur de l'impulsion ultrasonore émise, aussi appelée Spatial Pulse Length (SPL), qui fait intervenir la longueur d'onde λ à la fréquence centrale du capteur f_c , et le nombre de cycles dans l'impulsion (n) :

$$R_{axe} = \frac{SPL}{2} = \frac{\lambda n}{2} = \frac{vn}{2f_c}. \quad (1.28)$$

La résolution axiale est donc la même quelle que soit la profondeur d'inspection. Améliorer la résolution axiale revient à réduire la SPL et donc à augmenter la fréquence.

Résolution latérale : La résolution latérale R_{lat} , ou résolution spatiale, est la capacité à séparer deux points situés sur un plan perpendiculaire à l'axe de propagation. Elle dépend des caractéristiques géométriques du faisceau ultrasonore et est optimale

dans la zone focale. En dehors de cette zone, le faisceau ultrasonore est plus large et la résolution latérale est dégradée. Au point focal, elle est donnée par :

$$R_{lat} = \frac{\lambda F}{D} = \frac{v F}{D f_c}, \quad (1.29)$$

où F est la profondeur de focalisation et D l'ouverture du capteur. La résolution latérale correspond également à la largeur à mi-hauteur du faisceau. En imagerie médicale, la qualité de la résolution latérale est indiquée par le facteur $F_{\#} = F/D$ (aussi appelé F-number). La valeur de $F_{\#}$ dans le cas d'une très bonne focalisation se situe typiquement entre 1 et 2 et doit, dans l'idéal, rester constante quelle que soit la profondeur de focalisation F . Pour ce faire, on peut faire varier l'ouverture active D (c'est-à-dire le nombre d'éléments actifs) en fonction de F pour conserver une valeur de $F_{\#}$ à peu près constante.

Si l'on veut augmenter les résolutions axiale ou latérale à la fois, il est nécessaire d'augmenter la fréquence du capteur. Dans ce cas, à cause de l'atténuation, la profondeur de pénétration sera moindre. Si seule la résolution latérale nous intéresse, on peut toutefois conserver la même fréquence et augmenter l'ouverture D du capteur.

Profondeur de champ : La profondeur de champ est une donnée importante en imagerie ultrasonore car elle définit les limites de la profondeur d'inspection pour un capteur focalisé. Elle correspond en effet à la longueur du faisceau ultrasonore focalisé, et peut être estimée par la formule suivante [13] :

$$Z_{champ} = K \lambda \left(\frac{F}{D} \right)^2, \quad (1.30)$$

où $K \approx 9.7$ lorsque Z_{champ} correspond à la longueur du faisceau à mi-hauteur. Plus la profondeur de champ est importante, plus le faisceau reste focalisé sur une longue distance. Pour accroître la profondeur de champ (Z_{champ}) en $z = F$, il faut diminuer l'ouverture D , ce qui dégrade la résolution latérale R_{lat} . Ainsi, l'imagerie ultrasonore est un compromis permanent entre profondeur d'inspection et résolution.

3.3 Modification des grandeurs caractéristiques d'un champ focalisé en présence d'une interface

Les grandeurs données dans les sous-sections précédentes sont valables pour un capteur au contact d'un solide. Or, la plupart des contrôles réalisés durant cette thèse ont été effectués en immersion, en prenant en compte une interface eau/solide entre le capteur et la zone à imager (cf. figure 1.17). Cette section s'attache donc à évaluer l'influence de cette interface sur les grandeurs caractéristiques d'un champ focalisé.

Limite de champ proche : Si l'interface est placée à une distance inférieure à N dans l'eau, il faut définir une nouvelle limite de champ proche N' par rapport au

capteur. Pour une incidence normale, N' peut être exprimée en fonction du ratio des vitesses dans les deux matériaux (v_e dans l'eau et v_s dans le solide) [14] :

$$N' = (N - H) \frac{v_e}{v_s} + H, \quad (1.31)$$

où H est la hauteur d'eau entre le capteur et la pièce. Ainsi, dans le cas d'une interface eau/acier, la présence de l'interface tend à rapprocher la limite de champ proche du capteur.

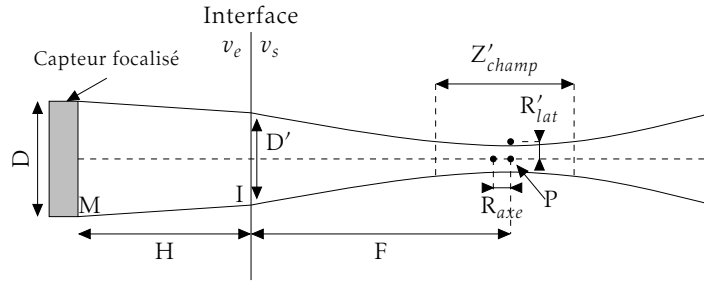


FIGURE 1.17 – Grandeurs caractéristiques d'une focalisation en présence d'une interface eau/solide.

Résolutions : Il a été montré que la résolution axiale R_{axe} dépend de la longueur du pulse ultrasonore émis, et donc de la longueur d'onde (cf. équation 1.28). Elle n'est donc pas modifiée par le passage d'une interface. Au contraire, lorsque l'on focalise à une profondeur F sous la surface avec un capteur multiéléments, le passage en immersion modifie la résolution latérale du fait de la réfraction à l'interface et de la plus grande distance ($H + F$) séparant le capteur du point focal. Dans ce cas, la résolution latérale définie par l'équation 1.29 peut être réécrite comme :

$$R'_{lat} = \frac{\lambda F}{D'}, \quad (1.32)$$

où D' est l'ouverture apparente du capteur sur la surface (cf. figure 1.17). Cette ouverture apparente peut être déterminée en calculant le point de passage à l'interface en $I(x, 0)$ du rayon partant de l'élément positionné à $M(0, H)$ en bord de capteur jusqu'à un point de focalisation $P(x_p, F)$ situé à une profondeur F sur l'axe du capteur. La relation de SNELL-DESCARTES donne l'expression suivante :

$$\gamma \frac{x}{\sqrt{x^2 + H^2}} - \frac{(x_p - x)}{\sqrt{(x_p - x)^2 + F^2}} = 0, \quad (1.33)$$

avec $\gamma = v_s/v_e$. En élevant au carré cette équation, on obtient une équation polynômiale de degré 4 :

$$x^4 - 2x_p x^3 + \left[x_p^2 + \frac{\gamma^2 F^2 - H^2}{\gamma^2 - 1} \right] x^2 + \frac{2x_p H^2}{\gamma^2 - 1} x - \frac{x_p^2 H^2}{\gamma^2 - 1}. \quad (1.34)$$

Les racines de cette équation peuvent être déterminées à l'aide de la méthode de FERRARI [15] et l'abscisse x du point I correspond à la racine réelle qui vérifie $0 \leq x \leq x_p$ pour $x_p \neq 0$. L'ouverture effective dépend de la hauteur d'eau et de la profondeur de focalisation, mais dans tous les cas, elle sera plus petite que l'ouverture réelle du capteur. D'après l'équation 1.32, on en déduit que la résolution latérale tend à se dégrader légèrement avec un capteur en immersion.

Profondeur de champ : De la même manière que la résolution latérale, la profondeur de champ dépend de l'ouverture apparente D' du capteur. Or, elle est inférieure à l'ouverture totale du capteur ce qui implique que la profondeur de champ est légèrement augmentée lorsqu'une interface est présente.

$$Z'_{champ} = K\lambda \left(\frac{F}{D'} \right)^2, \quad (1.35)$$

4 Les méthodes d'imagerie multiéléments

Les capteurs multiéléments présentent de nombreux avantages par rapport aux capteurs monoéléments. Le plus intéressant d'entre eux est la possibilité de réaliser des images, ce qui permet de simplifier l'interprétation des contrôles. Il est en effet possible de focaliser à différentes profondeurs et d'infléchir le faisceau ultrasonore avec un seul et même capteur. La vitesse d'inspection peut être augmentée en remplaçant un balayage mécanique par un balayage électronique (technique présentée plus loin dans cette section). Les méthodes d'imagerie multiéléments sont nombreuses et peuvent être plus ou moins sophistiquées en fonction de la complexité du milieu d'inspection (géométrie complexe, matériau anisotrope et/ou atténuant, bruit de structure,...) et des exigences de contrôle (précision du dimensionnement des défauts, vitesse d'inspection, traitements dans un système embarqué,...). Les méthodes de l'état de l'art présentées dans ce chapitre sont celles que l'on retrouve dans la plupart des appareils CND du marché : Omniscan (Olympus), Phaser (GE), Gekko (M2M), VEO (Sofranel),...

Dans un premier temps, les méthodes dites « conventionnelles » sont présentées. Elles sont caractérisées par une construction de l'image « ligne par ligne », c'est-à-dire que chaque ligne correspond à un tir focalisé. Dans un second temps, une méthode d'imagerie « point par point » est décrite. Dans ce cas, l'image est construite en focalisant les ondes en tous points/pixels de la zone image. Ce principe de focalisation point par point offre des avantages par rapport à l'imagerie conventionnelle, et certains appareils récents (par exemple, le Gekko) disposent de cette fonctionnalité en temps-réel.

4.1 Représentation des données ultrasonores

Il est possible de représenter les signaux reçus par un capteur multiéléments de plusieurs manières, chacune apportant des informations différentes sur le milieu inspecté.

A-Scan : la représentation de base des données ultrasonores est le A-Scan. C'est une représentation temps-tension du signal reçu par le capteur et il peut s'agir de A-Scans « élémentaires » ou de A-Scans « somme ». Pour un capteur de N éléments transmettant une onde, N A-Scans élémentaires sont enregistrés (un signal reçu par élément du capteur) et leur somme est appelée un A-scan somme.

B-Scan : le B-Scan est un cumul de A-Scans enregistrés en plusieurs positions d'un balayage mécanique ou électronique. Si seuls les A-Scans sommes sont enregistrés, un seul B-Scan « somme » (balayage/temps) est obtenu. En revanche, si les A-Scans élémentaires sont conservés, on obtient un B-Scan « voies » (récepteur/temps) pour chaque tir, en plus du B-Scan somme. Lorsque les propriétés acoustiques et géométriques de la pièce sont connues, le B-Scan somme peut être affiché dans une « vue pièce » sous la forme d'un B-Scan somme (balayage/profondeur). Le B-Scan est alors une coupe de la pièce inspectée, dans le plan de contrôle au capteur. Dans les deux types de B-Scans, l'amplitude du signal en chaque point est codée selon une échelle de couleur dont la brillance est fonction de l'amplitude du signal enregistré.

S-Scan : le S-Scan est un cumul de A-Scans « sommes » enregistré pour une seule position du capteur et plusieurs angles d'inspection. Le S-Scan peut être affiché sous la forme d'un S-Scan « somme » (tir/temps) ou dans une vue pièce (tir/profondeur).

Échodynamique horizontale ou verticale : une courbe échodynamique est obtenue en relevant le maximum d'amplitude le long de chaque ligne (échodynamique horizontale) ou de chaque colonne (échodynamique verticale) d'une image ultrasonore.

Dans le but de simplifier la lecture, les A-Scan somme, B-Scan somme et S-Scan somme seront désignés par les termes A-Scan, B-Scan et S-Scan dans la suite du manuscrit.

4.2 Imagerie B-Scan

Cette technique est la base du CND et consiste à focaliser le faisceau ultrasonore, en émission et en réception, en un seul point de la zone d'inspection, à l'aide d'une loi de retards appliquée aux éléments du capteur [16]. Une focalisation en un point donne un A-Scan, il faut donc effectuer un balayage mécanique pour obtenir une image. Cependant, si le capteur a un nombre d'éléments suffisamment important, le balayage mécanique peut être remplacé par un balayage électronique. Pour ce faire, on focalise dans la pièce avec un groupe d'éléments adjacents (on parle de sous-ouverture) du capteur. Le balayage électronique de la sous-ouverture permet de construire le B-Scan. Que ce soit en balayage mécanique ou électronique, l'angle et la profondeur de focalisation restent des données constantes.

4.2.1 Balayage mécanique

Le balayage mécanique consiste à déplacer le capteur dans une ou plusieurs directions au-dessus de la pièce à contrôler. La figure 1.18 présente un exemple de B-Scan mécanique obtenu avec un capteur linéaire de 64 éléments (fréquence centrale 2 MHz, pas interéléments 0,8 mm) en immersion. Le contrôle a été réalisé en focalisant en émission et en réception à 30 mm sous la surface, dans l'axe du capteur. L'image montre que les défauts à proximité du point focal sont bien détectés et localisés, contrairement aux défauts plus éloignés.

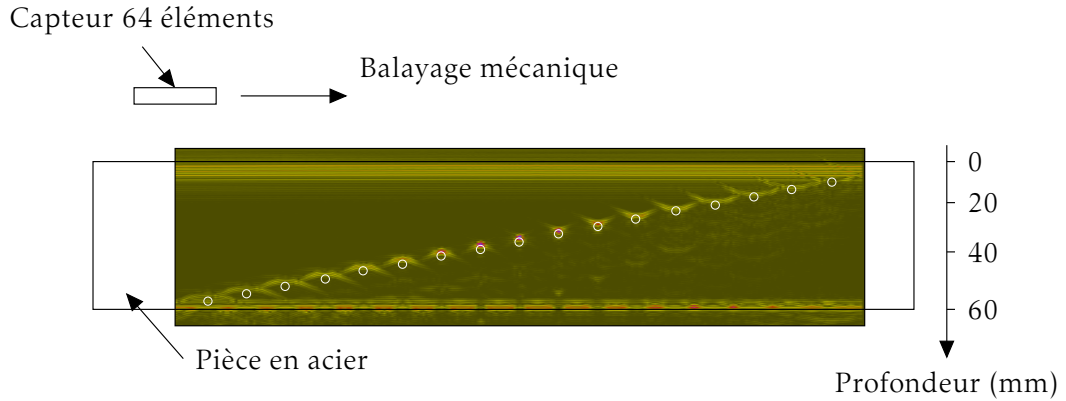


FIGURE 1.18 – Image B-Scan obtenue avec un balayage mécanique de la sonde et une focalisation en émission et réception à 30 mm de profondeur dans l'axe du capteur.

Si les capteurs linéaires peuvent être utilisés au-dessus d'une surface régulière (plane, cylindrique...), ce n'est plus le cas en présence d'une géométrie irrégulière. Actuellement, il n'existe pas de dispositif de contrôle en immersion capable d'adapter dynamiquement les lois de retards lors du déplacement au-dessus d'une surface complexe. Les solutions existantes se basent alors sur l'utilisation de capteurs flexibles au contact.

4.2.2 Balayage électronique

Le balayage électronique consiste à déplacer séquentiellement une sous-ouverture, constituée de plusieurs éléments adjacents, pour une position donnée du capteur (cf. figure 1.19). Le balayage électronique fournit un B-Scan en une position fixe au-dessus de la pièce et permet de remplacer un axe de balayage mécanique. Le nombre de séquences N_s (et donc de lignes dans l'image) pour un capteur de N éléments est égale à :

$$N_s = \text{Ent} \left[\frac{N - n - (N_1 - 1)}{p} \right] + 1, \quad (1.36)$$

où $\text{Ent}[]$ désigne la partie entière, n est le nombre d'éléments de la sous-ouverture, N_1 le numéro du premier élément actif, et p le pas électronique avec lequel se déplace la sous-ouverture.

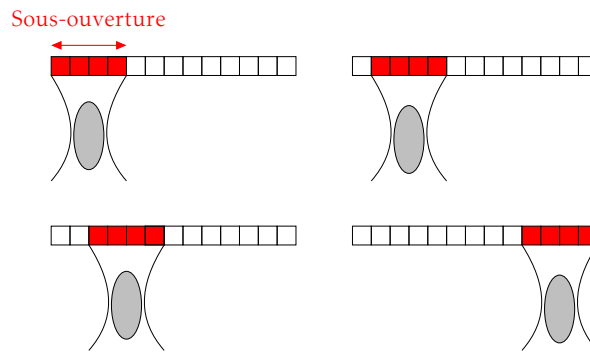


FIGURE 1.19 – Balayage électronique : une sous-ouverture focalise l'onde ultrasonore en émission et réception en un point et est déplacée le long du capteur pour former une image B-Scan.

Le B-Scan présenté sur la figure 1.20 est le résultat d'un balayage électronique avec une sous-ouverture de 20 éléments déplacée le long d'un capteur de 64 éléments. Le pas électronique correspond à 1 élément et le B-Scan est donc constitué de 45 lignes, chaque ligne représentant le A-Scan enregistré pour un tir focalisé à 45° et à 25 mm de profondeur. Cette figure démontre qu'il est possible de remplacer localement un déplacement mécanique par un balayage électronique. Cela peut présenter un grand intérêt en CND quand, pour des raisons d'accessibilité, il n'est pas possible de déplacer une sonde pour obtenir un B-Scan mécanique. Cependant, comme la largeur de l'image est limitée par le nombre d'éléments, le nombre de défauts visualisés est limité. Cette technique nécessite donc l'utilisation de capteurs comprenant un grand nombre d'éléments (≥ 128).

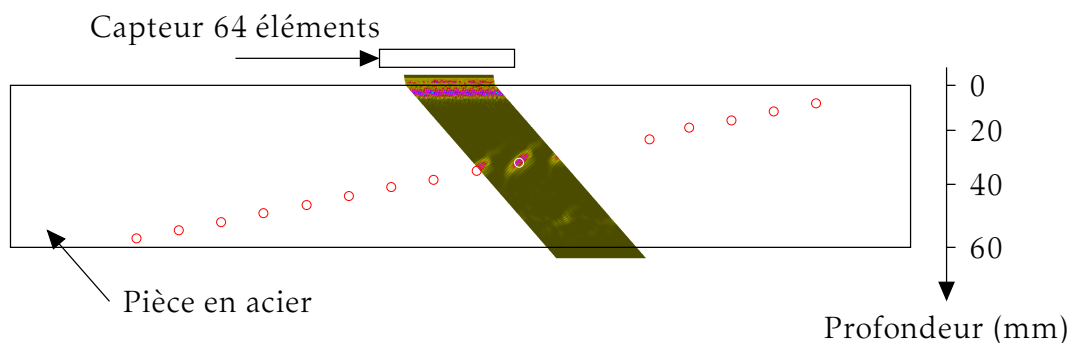


FIGURE 1.20 – Balayage électronique focalisé : une sous-ouverture de 20 éléments est déplacée électroniquement le long du réseau de 64 éléments, avec un pas électronique correspondant à 1 élément ; pour chaque séquence, le tir est focalisé à 45° et à 25 mm de profondeur dans l'axe de tir.

4.2.3 Focalisation dynamique

L'image en balayage mécanique (cf. figure 1.18) montre que la résolution latérale est optimale à proximité du point de focalisation, mais celle-ci se dégrade rapidement quand on s'éloigne de ce point. L'application d'une focalisation dynamique permet de corriger en partie ce problème. Le principe est de focaliser en réception en plusieurs profondeurs autour du point de focalisation en émission. La focalisation est dite dynamique car, pour un même tir focalisé en émission, les paramètres de focalisation en réception évoluent et dépendent du temps de propagation [17]. Ces paramètres sont la loi de retards et la taille de la sous-ouverture en réception qui, elle aussi, peut varier pour optimiser la détection en fonction de la profondeur. La résolution latérale R_{lat} étant proportionnelle au paramètre $F_{\#}$ ($F_{\#} = F/D$, cf. sous-section 3.2), une sous-ouverture D constante entraîne une variation de la résolution en fonction de la profondeur F . Pour conserver une résolution homogène, la valeur de $F_{\#}$ doit être maintenue constante en faisant varier D (cf. figure 1.21).

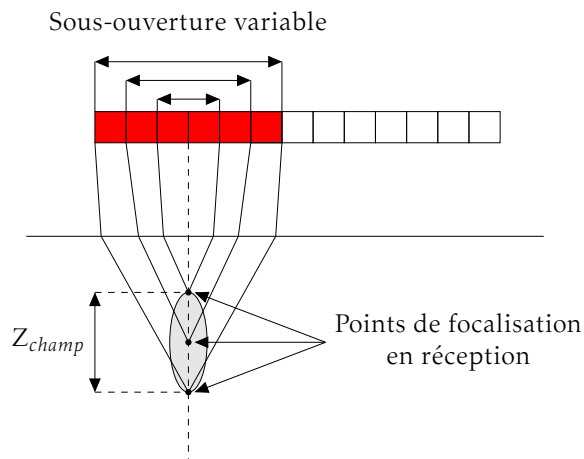


FIGURE 1.21 – Principe de la focalisation dynamique avec un $F_{\#}$ constant quelle que soit la profondeur (sous-ouverture variable).

La focalisation dynamique permet d'améliorer l'image à condition que la profondeur de champ du faisceau incident (Z_{champ} , cf. sous-section 3.2) ne soit pas trop petite par rapport à la hauteur de l'image. En effet, si Z_{champ} est petit, le faisceau est focalisé sur une très courte distance et les échos des réflecteurs trop éloignés de la zone focale sont extrêmement faibles. Le nombre de points de focalisation en réception est déterminé par rapport à la profondeur de champ Z_{champ} . Pour obtenir une résolution optimale quelle que soit la profondeur, la distance entre deux points de focalisation en réception doit être inférieure à $Z_{champ}/2$.

La figure 1.22 montre le résultat obtenu dans la même configuration que pour la figure 1.18 avec, cette fois-ci, l'application de la focalisation dynamique. L'émission est donc focalisée à 30 mm tandis que la réception l'est tous les 12 mm ($Z_{champ} \approx 25$ mm) de 10 à 50 mm. Si l'on compare l'image obtenue (figure 1.22) avec celle sur

la figure 1.18, on remarque que les défauts imagés avec la méthode de focalisation dynamique sont mieux résolus, en particulier à proximité de la surface et du fond.

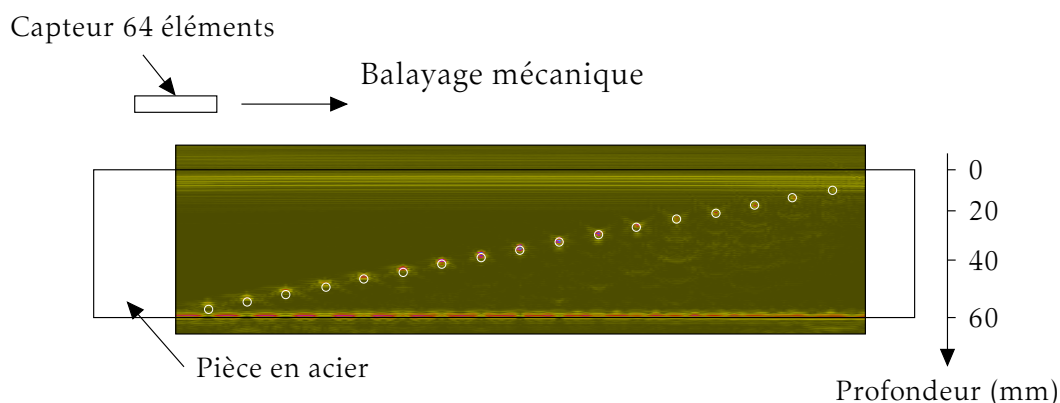


FIGURE 1.22 – Balayage mécanique avec, pour chaque position, une focalisation en émission à 30 mm de profondeur et une focalisation dynamique.

4.3 Imagerie S-Scan

L'imagerie S-Scan, résultant d'un balayage angulaire focalisé, est l'imagerie multiéléments de loin la plus utilisée en CND [18]. Par rapport aux précédentes méthodes, le balayage angulaire fournit une image en une seule position de la sonde et sans recourir à un balayage électronique. Le principe est d'émettre successivement plusieurs ondes focalisées suivant différentes directions. Il fournit une image sectorielle de la zone inspectée, communément appelée S-Scan. Contrairement au balayage électronique où la taille de l'image est limitée par le nombre d'éléments du capteur, l'image S-Scan peut couvrir une large zone d'intérêt dans la pièce. Le secteur angulaire d'un S-Scan est défini par ses deux angles extrêmes (direction de focalisation du premier et du dernier tirs) qui dépendent des caractéristiques du capteur et en particulier de sa directivité. Le pas angulaire est en général constant. Il définit la résolution angulaire et influe sur la vitesse d'inspection. Plus le pas angulaire est fin, meilleure est la résolution angulaire de l'image. En contrepartie, le nombre de tirs est plus important et réduit la cadence d'imagerie. Le balayage angulaire présente un intérêt lorsque, pour des raisons d'accessibilité, on souhaite réaliser une image en une position fixe de la sonde (pas de possibilité de réaliser un balayage mécanique) ou lorsque le nombre limité d'éléments ne permet pas d'exploiter un balayage électronique, comme décrit en 4.2.

Le S-Scan issu d'un balayage angulaire focalisé entre -70° et 70° avec un pas angulaire de 1° et une focalisation à 38 mm de profondeur est donné sur la figure 1.23. On constate qu'un plus grand nombre de défauts est imagé et que la taille de l'image n'est pas limitée par l'ouverture du capteur. Comme en imagerie de type B-Scan, on note également que la résolution est optimale à la profondeur de focalisation.

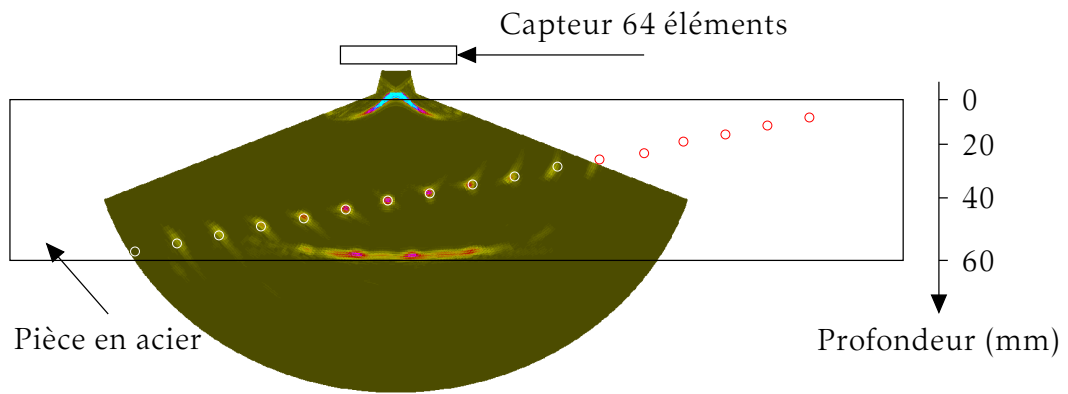


FIGURE 1.23 – Image S-Scan résultant d'un balayage angulaire focalisé. Chaque ligne de l'image correspond à un angle et une profondeur de focalisation.

4.4 Imagerie multifocus

La méthode multifocus, employée couramment dans le domaine de l'imagerie médicale, est une amélioration de l'imagerie B-Scan en balayage électronique (cf. sous-section 4.2.2) car chaque ligne de l'image est construite à partir de plusieurs tirs focalisés à différentes profondeurs. Cette méthode s'avère utile quand la focalisation dynamique ne suffit pas à améliorer l'image B-Scan avec un seul tir focalisé, ce qui est notamment le cas lorsque la profondeur de champ est petite par rapport à l'épaisseur de la pièce. Elle permet également de maximiser le niveau de détection dans des matériaux atténuants.

Comme le B-Scan en balayage électronique, une sous-ouverture de plusieurs éléments voisins est définie et déplacée le long du réseau. Chaque position de la sous-ouverture correspond à une ligne de l'image. Plusieurs lois de retards sont appliquées à cette sous-ouverture pour focaliser en émission à différentes profondeurs. Pour optimiser la méthode multifocus, le pas entre deux points focaux doit correspondre à $Z_{champ}/2$ et la sous-ouverture doit être de taille variable pour conserver un $F_{\#}$ constant. Pour un capteur et une sous-ouverture composés respectivement de N et n éléments, le nombre de lignes N_s dans l'image multifocus est donné par l'équation 1.36. Si l'image multifocus est réalisée à l'aide de P profondeurs de focalisation, alors le nombre total de tirs est $P \times N_s$.

L'image de la figure 1.24 est obtenue en appliquant le même balayage électronique qu'en 4.2.2, avec 4 profondeurs de focalisation (de 10 à 50 mm) et un $F_{\#}$ fixé à 1. Au total, l'image est donc réalisée avec 220 tirs. Comme pour le balayage électronique, la largeur de l'image est limitée par l'ouverture du capteur, et seuls 3 défauts sont imagés.

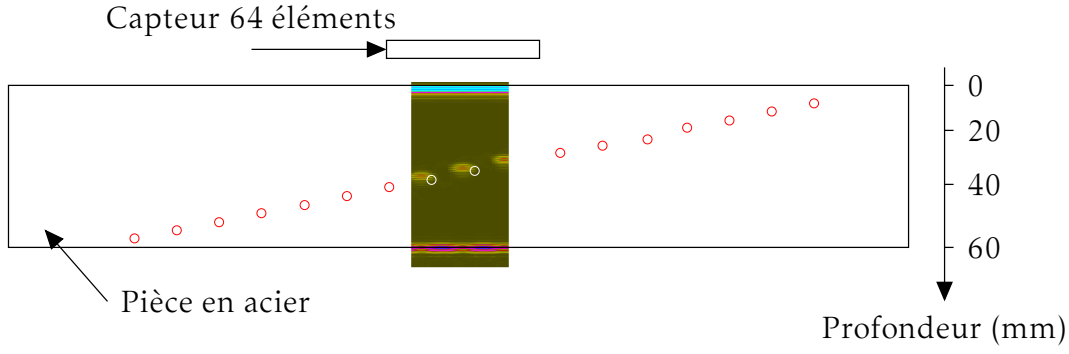


FIGURE 1.24 – Image multifocus obtenue en focalisant à 4 profondeurs à l'émission.

4.5 Imagerie Synthetic Transmit Aperture

La méthode STA [19, 20], aussi connue sous le nom de Total Focusing Method (TFM [21]) ou encore Focalisation en Tous Points (FTP [22]) dans le domaine du CND, est une méthode d'imagerie de plus en plus répandue. Elle repose sur le traitement de la matrice $\mathbf{K}(t)$ des réponses impulsionnelles interéléments [23] et permet de focaliser en émission et en réception en chaque point d'une zone d'intérêt. Pour un capteur composé de N éléments, l'acquisition de la matrice $\mathbf{K}(t)$ consiste à enregistrer les $N \times N$ réponses impulsionnelles $k_{ij}(t)$, correspondant au signal reçu par l'élément j quand une onde impulsionnelle est émise par l'élément i (cf. figure 1.25). Il est à noter qu'en théorie, en vertu du principe de réciprocité, la matrice $\mathbf{K}(t)$ est symétrique, et qu'elle pourrait être construite en enregistrant uniquement $N(N+1)/2$ signaux. Cependant, en pratique, le principe de réciprocité n'est pas exactement satisfait à cause du bruit électronique et de la variation des réponses acousto-électriques entre les éléments [23]. Les acquisitions se feront donc en enregistrant N^2 signaux.

L'algorithme STA consiste ensuite à sommer de manière cohérente les signaux analytiques $s_{ij}(t) = k_{ij}(t) + jH(k_{ij}(t))$ (où H est la transformée de HILBERT). Pour un point P de focalisation, l'amplitude $A(P)$ est donnée par :

$$A(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Gamma_i^e(P) W_j^r(P) s_{ij}(t_i^e(P) + t_j^r(P)) \right|, \quad (1.37)$$

où $t_i^e(P)$ (respectivement $t_j^r(P)$) est le temps de vol entre l'émetteur i (le récepteur j) et le point P (cf. figure 1.25) et $\Gamma_i^e(P)$ et $W_j^r(P)$ sont des coefficients de pondération qui dépendent de l'application souhaitée. Par exemple, ces coefficients peuvent représenter des lois d'apodisation en émission et réception [24]. La sommation cohérente de l'équation 1.37 exprime une focalisation dynamique des signaux $k_{ij}(t)$ en tous points de l'image pour chaque tir réalisé avec un élément i . La sous-ouverture en émission étant réduite à un seul élément actif, on a $F_{\#} \gg 1$, et la focalisation dynamique optimise la résolution latérale quel que soit le point de l'image.

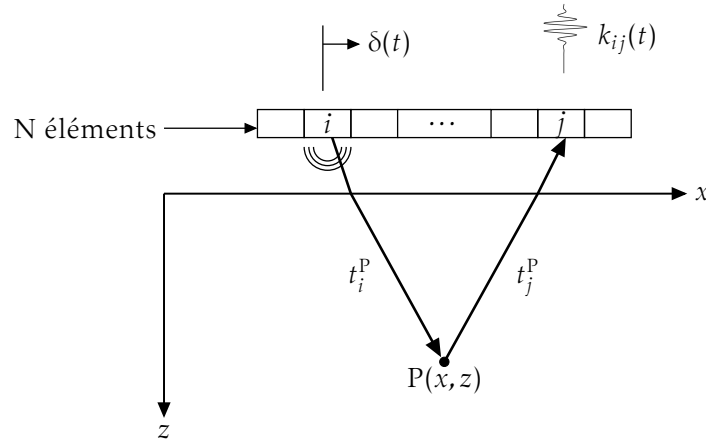


FIGURE 1.25 – Réponse impulsionnelle interéléments : le signal $k_{ij}(t)$ est le signal reçu par l'élément j après émission par l'émetteur i et propagation dans le milieu. L'ensemble des $k_{ij}(t)$ enregistrés pour chaque couple émetteur/récepteur forme la matrice $\mathbf{K}(t)$.

Le premier avantage de cette méthode est que la longueur de l'image n'est plus limitée par le nombre d'éléments comme en imagerie B-Scan. De plus, comme un seul élément est utilisé à chaque tir, le paramètre $F_{\#}$ est grand, quelle que soit la profondeur dans la zone image, et la résolution latérale est donc optimale en tous points. Un autre avantage est que le nombre de points de focalisation est indépendant du nombre d'éléments, ce qui permet de faire de l'imagerie avec peu d'éléments (typiquement 32 ou 64) voire de l'imagerie 3d. En outre, le nombre de tirs reste égal au nombre d'éléments, contrairement à l'imagerie S-Scan ou multifocus, ce qui peut améliorer les cadences d'image. Finalement, la construction point par point de l'image ouvre la possibilité d'utiliser des modes de propagation complexes (cf. figure 1.26). Le plus simple est appelé mode « direct » pour lequel le signal enregistré correspond au trajet direct aller/retour entre l'émetteur, le point de focalisation et le récepteur. Dans la suite de ce manuscrit, l'utilisation du mode direct est indiquée par la notation XdX , où X représente la polarisation de l'onde (L ou T) et d marque le rebond sur le défaut. C'est ce mode qui est utilisé dans l'imagerie conventionnelle. Il sert à imager des défauts volumiques (porosités, inclusions,...), mesurer des épaisseurs (caractérisation de corrosion...) et détecter des défauts de type fissures grâce aux échos de diffraction à leurs extrémités. Un mode plus complexe, appelé mode « demi-bond », prend en compte une réflexion sur le fond de la pièce. Dans ce cas, les ondes utilisées pour l'imagerie STA sont supposées être réfléchies sur le fond de pièce avant ou après l'interaction avec le défaut. Ces deux modes sont indiqués par les notations $XrXdX$ (où r marque le rebond sur le fond) et $XdXrX$. Ils présentent l'avantage de pouvoir imager les fissures sur toute leur longueur, facilitant ainsi leur caractérisation [22, 25–27]. Quel que soit le mode utilisé, la propagation des ondes sur les différents trajets peut se faire avec la même polarisation (LdL, TdT, TrTdT, LrLdL,...) ou présenter une ou des conversions de modes (LdT, TdL, LrTdT, LrLdT,...). En

demi-bond, ces conversions sont particulièrement utiles pour imager des fissures inclinées, ou éloignées du fond de pièce. Il est à noter que les trajets $XrXdX$ et $XdXrX$ sont équivalents si la polarisation de l'onde est identique dans les deux modes de propagation.

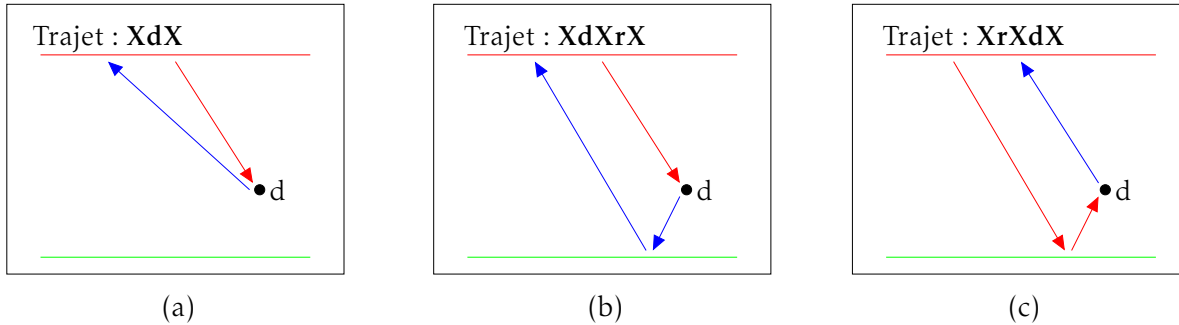


FIGURE 1.26 – Illustration des modes de propagation utilisés en imagerie STA (– : trajet aller, – : trajet retour). (a) Mode direct XdX , (b) mode demi-bond $XdXrX$ et (c) mode demi-bond $XrXdX$.

La figure 1.27 présente une image STA obtenue en mode direct LdL . On peut voir que la zone image dépasse l'ouverture du capteur et que les défauts sont bien imagés, quelle que soit leur position. On note également que la résolution est optimale dans toute la zone d'intérêt.

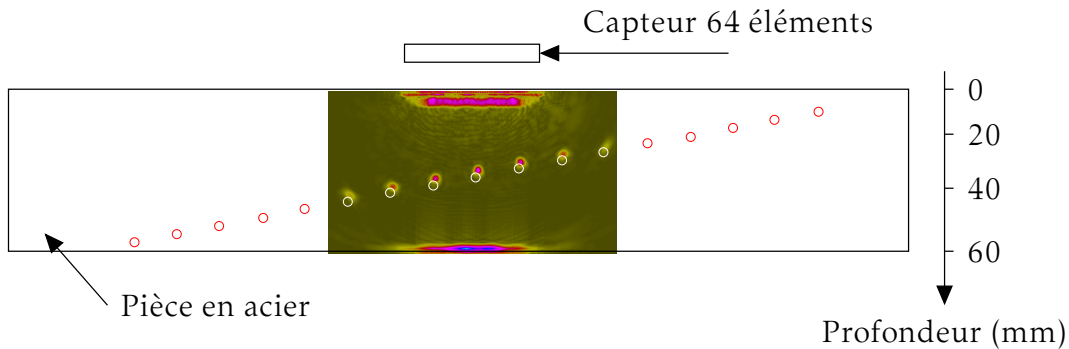


FIGURE 1.27 – Image STA en mode direct : un capteur est fixe et la zone imagée est plus grande que son ouverture.

L'utilisation des modes direct et demi-bond pour la détection d'une fissure est illustrée sur les figures 1.28a et 1.28b. En mode direct LdL l'entaille peut être détectée grâce à la présence de deux échos : l'écho de coin, situé au pied de l'entaille, et l'écho de diffraction visible au sommet. Dans ce mode d'imagerie, la caractérisation de l'entaille, c'est-à-dire l'évaluation de sa hauteur, peut s'avérer délicate si l'écho de diffraction est peu visible (par exemple en présence de bruit). En mode demi-bond $TrTdT$, la fissure est complètement imagée, de sa base jusqu'à son sommet. Il est donc plus facile d'évaluer l'extension du défaut avec ce mode.

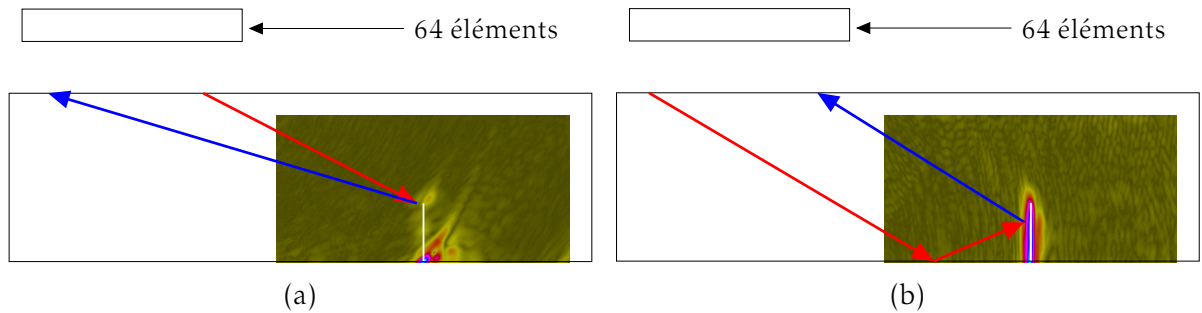


FIGURE 1.28 – Image STA d’une entaille débouchante et normale au fond de pièce en mode (a) direct LdL et (b) demi-bond TrTdT.

L’imagerie STA présente quelques inconvénients, principalement dus à la méthode d’acquisition. L’acquisition STA implique d’émettre avec un élément à la fois, ce qui limite l’amplitude de l’onde transmise dans le matériau, et se traduit par une diminution du RSB sur les signaux élémentaires. Cela peut s’avérer gênant dans le cas de matériaux fortement atténuants et/ou en présence de bruit. D’autre part, dans certaines situations de contrôle (notamment lorsque l’image n’est pas réalisée dans l’axe du capteur), il peut y avoir apparition d’échos non-physiques, aussi appelés artéfacts d’imagerie, qui peuvent fausser l’interprétation des images [22, 27]. Cet aspect est détaillé dans le chapitre suivant. Le second inconvénient est l’important volume de données, qui implique un espace de stockage et des temps de traitement importants. Des techniques existent pour réduire le nombre de signaux, par exemple la Sparse Matrix Capture, qui utilise seulement quelques éléments en émission, et compense la perte d’amplitude en créant des sources virtuelles [28–31]. Cependant, ces techniques s’appliquent principalement à des surfaces planes et sont difficilement généralisables à des surfaces complexes car la combinaison d’émetteurs devrait changer en fonction de l’évolution de la surface.

5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, les principaux aspects du CND par ultrasons ont été présentés, à savoir : quelques notions de base sur la propagation des ondes ultrasonores, le principe de fonctionnement des capteurs piézoélectriques, et les caractéristiques d’un champ ultrasonore focalisé. Dans un second temps, les méthodes d’imagerie les plus couramment utilisées en CND ont été introduites. Il ressort de cette présentation que la méthode STA possède le plus de potentiel pour l’obtention d’images de haute qualité. Les algorithmes permettant le calcul des temps de vol en modes direct et demi-bond seront détaillés dans le chapitre suivant. Cependant, la méthode pâtit de quelques inconvénients. Par exemple, la méthode d’acquisition implique un nombre de tirs égal au nombre d’éléments du capteur, ce qui allonge les temps d’acquisition lorsque ce nombre devient important (128, 256 éléments). Or, il existe d’autres méthodes qui montrent une qualité d’image équivalente à l’imagerie STA tout en nécessitant

moins de transmissions. C'est le cas notamment de la méthode Coherent Plane Wave Compounding utilisée en imagerie médicale [32–34]. Elle se base sur la transmission d'ondes planes en utilisant tous les éléments du capteur à chaque émission et permet d'atteindre de très haute cadences d'imagerie. Dans le chapitre 2, cette méthode est modifiée pour être applicable au CND, en particulier par la prise en compte d'une interface et par l'utilisation de modes de propagation complexes.

Chapitre 2

Développement d'une méthode d'imagerie rapide par émission d'ondes planes

Ce chapitre présente une nouvelle méthode échographique pour le CND qui pallie certains inconvénients de l'imagerie STA identifiés au chapitre 1. Cette méthode s'inspire de l'imagerie ultrarapide implémentée dans de récents scanners médicaux. Le principe de l'acquisition est d'émettre des ondes planes de forte amplitude en excitant tous les éléments du capteur. Ces ondes planes sont transmises dans le milieu avec différents angles d'incidence. Dans ce chapitre, nous montrons que l'imagerie en ondes planes donne des résultats comparables à ceux de la méthode STA, et qu'il est possible de réduire significativement le nombre de tirs ultrasonores. Dans un premier temps, les algorithmes de l'imagerie STA sont détaillés pour les modes de propagation direct et demi-bond en immersion. Puis, la méthode baptisée Plane Wave Imaging (PWI) est décrite. Des résultats expérimentaux sont ensuite présentés pour les deux méthodes, ainsi que des comparaisons en termes de qualité d'image et de rapidité (nombre de tirs, de données à stocker...). Ils mettent en évidence que la méthode PWI donne des images de qualité égale à celles obtenues par STA, tout en nécessitant moins de transmissions, particulièrement lorsque le mode de propagation demi-bond est utilisé [35].

1 Imagerie STA

Il a été montré dans le chapitre 1 que l'algorithme STA nécessite le calcul des temps de parcours ultrasonores associés à tous les couples émetteur/récepteur d'un réseau de N éléments. En immersion, la difficulté réside dans la détermination des trajets ultrasonores en tenant compte de la réfraction à l'interface entre le milieu couplant et le milieu inspecté. Les trajets ultrasonores sont déterminés par une approche par rayons. Cette approche est possible car les zones d'inspection sont éloignées du capteur (plusieurs dizaines de longueurs d'onde), les éléments sont petits devant les longueurs d'onde considérées, les ondes de volume sont non-dispersives et enfin le matériau est homogène et isotrope. Les sections suivantes décrivent les équations permettant leur calcul pour les modes de propagation direct et demi-bond, présentés au chapitre 1 (sous-section 4.5), dans le cas d'une surface plane et d'un capteur en immersion.

En un point P d'une image STA, on rappelle que l'amplitude $A(P)$ est donnée par :

$$A(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Gamma_i^e(P) W_j^r(P) s_{ij}(t_i^e(P) + t_j^r(P)) \right|, \quad (2.1)$$

où $s_{ij}(t)$ est le signal analytique, $t_i^e(P)$ est le temps de parcours, aussi appelé « temps de vol », entre l'émetteur et le point de focalisation P , $t_j^r(P)$ est le temps de parcours entre le point de focalisation et le récepteur. Γ_i^P et W_j^P sont des coefficients de pondération qui seront explicités par la suite (cf. 2.2.4).

1.1 Imagerie en mode direct

En mode direct, le calcul d'une image suppose que toutes les ondes enregistrées correspondent à des trajets entre les émetteurs et les récepteurs, sans interaction avec le fond de pièce. En immersion, chaque trajet interéléments inclut alors deux réfractions à l'interface eau/solide : une pendant le trajet aller jusqu'au point P , l'autre pendant le trajet retour du point P jusqu'au récepteur. Le trajet direct interéléments est schématisé sur la figure 2.1.

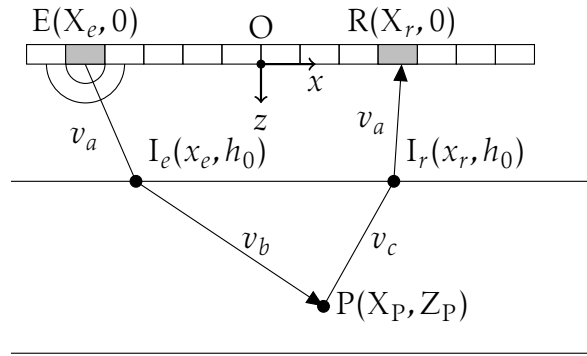


FIGURE 2.1 – Imagerie STA en mode direct : une onde cylindrique transmise par l'élément E se propage jusqu'au point de focalisation P après réfraction au point I_e de la surface. L'onde réfléchi en direction du récepteur R est réfractée au point I_r de la surface.

Lors du trajet aller, l'onde ultrasonore se propage de l'émetteur $E(X_e, 0)$ jusqu'au point de réfraction $I_e(x_e, h_0)$ sur la surface (appelé point d'impact) à la vitesse du son dans l'eau v_a (h_0 est la hauteur de la colonne d'eau). Elle se propage ensuite du point d'impact I_e jusqu'au point de focalisation $P(X_P, Z_P)$ à la vitesse v_b , qui peut être celle des ondes longitudinales (v_L) ou celle des ondes transversales (v_T), en fonction du mode utilisé pour calculer l'image ($v_c \neq v_b$ si l'image est calculée avec une conversion de mode LdT ou TdL). Le trajet retour à partir du point P est similaire au trajet aller avec un trajet dans le matériau jusqu'au point d'impact $I_r(x_r, h_0)$ à la vitesse v_c (v_L ou v_T), puis de I_r jusqu'à $R(X_r, 0)$ à la vitesse v_a . Comme on peut le voir, déterminer le chemin suivi par une onde revient à déterminer les abscisses des points d'impact I_e

et I_r . Les trajets aller et retour étant équivalents pour un couple élément/point de focalisation, la démonstration qui suit est présentée uniquement pour le trajet aller.

Le temps de parcours entre un émetteur et un point de focalisation s'écrit :

$$t_i^e(x_e) = \frac{\sqrt{(x_e - X_e)^2 + h_0^2}}{v_a} + \frac{\sqrt{(X_P - x_e)^2 + (Z_P - h_0)^2}}{v_b}. \quad (2.2)$$

Le principe de Fermat implique que le parcours suivi par l'onde correspond au temps de vol minimal. Déterminer ce trajet revient à calculer l'abscisse x_e du point de la surface I_e . Pour cela, nous utilisons une méthode numérique itérative, la méthode de descente de gradient, qui consiste à descendre le long de la plus grande pente locale et permet de trouver des minima locaux d'une fonction $f(x)$ [36, 37]. Elle s'écrit :

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + d_k g_k, \quad (2.3)$$

où (k) est l'ordre d'itération, d_k est le pas de descente et g_k la direction de descente. Cette dernière est simplement donnée par :

$$g_k = -\left. \frac{df}{dx} \right|_{x^{(k)}}. \quad (2.4)$$

Si la dérivée seconde de $f(x)$ existe, il est possible d'utiliser un pas d_k dit « optimal » qui est déterminé de la façon suivante. Le développement de TAYLOR de la dérivée de la fonction f s'exprime comme :

$$f'(x^{(k)} + dx_k) = f'(x^{(k)}) + f''(x^{(k)}) dx_k + o(dx_k^2). \quad (2.5)$$

La manière la plus simple de minimiser la fonction $f(x)$ est d'annuler sa dérivée et donc, dx_k vaut :

$$dx_k = -\frac{f'(x^{(k)})}{f''(x^{(k)})}. \quad (2.6)$$

Or $g_k = -f'(x^{(k)})$, l'équation 2.6 se réécrit donc :

$$dx_k = \frac{g_k}{f''(x^{(k)})}. \quad (2.7)$$

En posant $dx_k = d_k g_k$, la valeur du pas optimal d_k est :

$$d_k = \frac{1}{f''(x^{(k)})}. \quad (2.8)$$

Dans le cas présent, la fonction $f(x_e) = t_i^e(x_e)$ (cf. équation 2.2) et l'abscisse x_e est donc obtenue en itérant l'équation suivante :

$$x_e^{(k+1)} = x_e^{(k)} - \frac{f'(x^{(k)})}{f''(x^{(k)})}. \quad (2.9)$$

Le point d'impact à la surface, d'abscisse x_e , est nécessairement situé entre les abscisses de l'émetteur (X_e) et du point de focalisation X_P ($X_e \leq x_e \leq X_P$). De plus, comme la vitesse dans l'eau est significativement inférieure à celle dans le milieu d'inspection, l'abscisse du point d'impact est plus proche de l'abscisse de l'émetteur. Pour cette raison, la méthode itérative est initialisée à $x^{(k)} = X_e$ pour $k = 0$. Une fois les coordonnées du point d'impact connues, la distance entre un émetteur et un point de focalisation peut être calculée, ce qui donne le temps de vol associé (équation 2.2).

Concernant la quantité de données à calculer, il faut noter que le nombre de temps de vol pour constituer une image diffère en fonction du mode de propagation choisi. Sans conversion de mode (image LdL ou TdT), les trajets aller et retour sont identiques ($t_i^e(P) = t_j^r(P)$ si $i = j$) et le nombre de temps de vol à calculer est N pour chaque point de focalisation (où N est le nombre d'éléments du réseau). Avec conversion de modes (image LdT ou TdL), les trajets aller et retour sont différents ($t_i^e(P) \neq t_j^r(P)$ quels que soient i et j) et le nombre de temps de vol devient $2N$.

1.2 Imagerie en mode demi-bond

Comme présenté dans le chapitre 1 (sous-section 4.5), il est possible d'utiliser d'autres modes de propagation que le mode direct, par exemple, le mode demi-bond. Comme ce mode inclut une réflexion sur le fond de pièce, les trajets aller et retour sont différents, même sans conversion de modes (cf. figure 2.2).

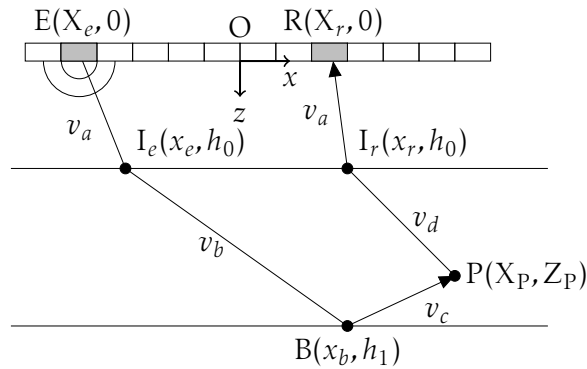


FIGURE 2.2 – Imagerie STA en mode demi-bond : une onde cylindrique émise par l'élément E se propage jusqu'au point de focalisation P après réfraction au point I_e de la surface et réflexion sur le fond de pièce en B, et retourne au récepteur R en passant par le point I_r de la surface.

En demi-bond, le principe de calcul du temps de vol pour le trajet retour reste inchangé par rapport au mode direct. Par contre, le trajet aller inclut maintenant une

propagation à la vitesse v_c depuis le fond de pièce jusqu'au point de focalisation P. En utilisant les notations de la figure 2.2, le temps de vol pour le trajet aller s'écrit alors :

$$t_i^e(x_e, x_b) = \frac{\sqrt{(x_e - X_e)^2 + h_0^2}}{v_a} + \frac{\sqrt{(x_b - x_e)^2 + (h_1 - h_0)^2}}{v_b} + \frac{\sqrt{(X_p - x_b)^2 + (Z_p - h_1)^2}}{v_c}, \quad (2.10)$$

où (X_b, h_1) sont les coordonnées du point B sur le fond ($h_1 = h_0 + h$ avec h l'épaisseur de la pièce). Pour déterminer ce temps de trajet, il faut donc calculer les abscisses des points I_e et B, ce qui peut être fait de la même manière que dans la section précédente, en considérant une fonction de deux variables $f(x_e^{(k)}, x_b^{(k)})$. En posant $\mathbf{X}_k = (x_e^{(k)}, x_b^{(k)})$, le développement de TAYLOR de f'' s'écrit :

$$f'(\mathbf{X}_k + d\mathbf{X}_k) = -\mathbf{g}_k + \mathbf{H}d\mathbf{X}_k, \quad (2.11)$$

avec $\mathbf{g}_k = -\nabla f(\mathbf{X}_k)$ [38] et \mathbf{H} la matrice hessienne donnée par :

$$\mathbf{H}\left(f\left(x_e^{(k)}, x_b^{(k)}\right)\right) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_e^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_e \partial x_b} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_b \partial x_e} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_b^2} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Pour minimiser la fonction f , il faut annuler l'équation 2.11 :

$$-\mathbf{g}_k + \mathbf{H}d\mathbf{X}_k = 0. \quad (2.13)$$

En multipliant l'équation 2.13 par \mathbf{g}_k et en posant $d\mathbf{X}_k = d_k \mathbf{g}_k$, le pas de descente d_k est alors donné par :

$$d_k = \frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\mathbf{g}_k(\mathbf{H}\mathbf{g}_k)}. \quad (2.14)$$

La fonction f est donnée par l'équation 2.10 et les abscisses des points I_e et B sont les limites de la suite récurrente suivante :

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\mathbf{g}_k(\mathbf{H}\mathbf{g}_k)} \mathbf{g}_k, \quad (2.15)$$

Les valeurs d'initialisation choisies sont : $x_e^{(k)} = X_e$ (abscisse de l'émetteur) et $x_b^{(k)} = X_p$ (abscisse du point de calcul) pour $k = 0$. Pour une surface plane, 2 à 3 itérations sont suffisantes pour faire converger la méthode. Des exemples de convergence seront présentés au chapitre 3.

En ce qui concerne le nombre de temps de vol, comme les trajets aller et retour sont différents dans tous les cas, il y a $2N$ temps de vol à calculer pour chaque point P de la zone image.

2 Imagerie PWI

Le principe de l'imagerie par émission d'ondes planes, aussi appelée Plane Wave Imaging (PWI), est d'émettre un ensemble de Q ondes planes sous différents angles et d'enregistrer les signaux avec les N éléments du capteur. À l'origine inventée pour l'imagerie médicale [32–34], cette méthode est ici généralisée pour traiter les cas d'application en CND, notamment l'imagerie en demi-bond (le cas de pièces de géométries complexes sera abordé dans le chapitre 3).

2.1 Principe de l'imagerie PWI médicale

La méthode PWI en échographie médicale est une généralisation de la méthode Single Plane Wave Imaging (SPWI) [39]. Dans cette dernière, une seule onde plane est émise à 0° dans le matériau et est ensuite rétrodiffusée par les hétérogénéités du milieu. Les signaux sont alors enregistrés avec les N éléments du capteur. L'image est construite ligne par ligne (cf. figure 2.3b) en appliquant un balayage électronique en réception et une focalisation dynamique à différentes profondeurs pour chaque pas du balayage. La construction d'une image SPWI repose donc sur le même principe qu'un B-Scan en balayage électronique associé à une focalisation dynamique (cf. chapitre 1 sous-section 4.2.3), sauf qu'un seul tir est réalisé avec tous les éléments du réseau.

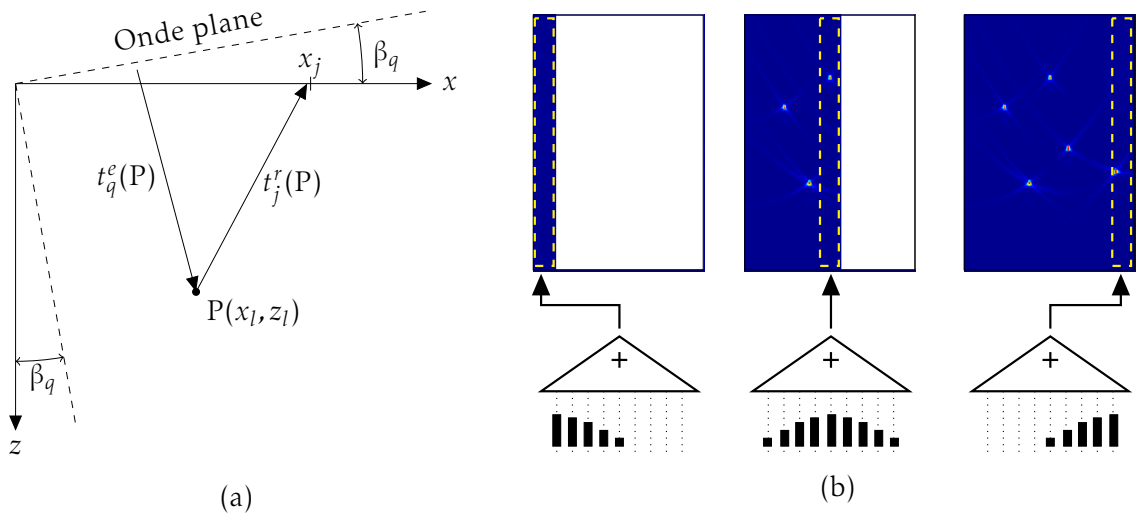


FIGURE 2.3 – Imagerie PWI médicale pour une unique onde plane : (a) représentation schématique de l'émission d'une onde plane et (b) construction d'une image PWI : une image est calculée ligne par ligne en focalisant dynamiquement à chaque pas du balayage électronique en réception.

En notant l l'indice d'une ligne de l'image et en considérant une sous-ouverture de n éléments, chaque ligne de l'image correspond à un A-Scan $S_l(t)$ obtenu en décalant temporellement les signaux avec des retards τ_j^l et en sommant les contributions de tous les signaux $k_j(t)$:

$$S_l(t) = \begin{cases} \sum_{j=l-\frac{n}{2}}^{l+\frac{n}{2}} k_j(t - \tau_j^l) & \text{si } 1 \leq l - \frac{n}{2} \text{ et } l + \frac{n}{2} \leq N, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad (2.16)$$

où les retards τ_j^l sont donnés par $\tau_j^l = t_j^l - \min_{j=1}^N(t_j^l)$, avec :

$$t_j^l(\beta, x_j, l) = \frac{z_l \cos \beta_q + x_l \sin \beta_q}{v} + \frac{\sqrt{z_l^2 + (x_l - x_j)^2}}{v}, \quad (2.17)$$

avec x_l l'abscisse de la ligne et z_l les points de focalisation en réception, β_q l'angle de transmission de l'onde plane, x_j la position du récepteur j et v est la vitesse dans le milieu, considérée constante (cf. figure 2.3a).

La méthode SPWI (pour laquelle $\beta_q = 0^\circ$) permet d'atteindre des cadences d'imagerie très élevées (jusqu'à 10 000 images par seconde dans les scanners médicaux récents, avec traitements parallèles). Cependant, le RSB de l'image est faible. La figure 2.4a donne un exemple d'image SPWI obtenue dans un fantôme biologique comprenant des inclusions de différentes tailles. On observe que les inclusions ressortent peu du bruit. Dans le cas du balayage électronique focalisé (figure 2.4c, 256 lignes), l'image est nette dans la zone focale mais se dégrade rapidement dans les zones hors-champ, même si une focalisation dynamique est appliquée. En focalisant à plusieurs profondeurs à l'émission (méthode multifocus), l'image est nette quelle que soit la profondeur (cf. figure 2.4d). Cependant, cela se traduit par une forte augmentation du nombre de tirs (256 lignes \times 4 profondeurs).

MONTALDO *et al.* [32] ont alors proposé une généralisation de la méthode, nommée Coherent Plane Wave Compounding (CPWC), qui consiste à exploiter plusieurs ondes planes émises avec différents angles en appliquant les lois de retards adéquates pour dévier le faisceau. L'angle d'incidence β_q doit alors être pris en compte dans le calcul des retards à appliquer pour obtenir chaque ligne de l'image (cf. équation 2.17). L'image finale est réalisée en combinant les images obtenues avec les différentes ondes planes. L'imagerie CPWC est donc un balayage angulaire non focalisé en émission, couplé à un balayage électronique et à une focalisation dynamique en réception. L'image du fantôme biologique, obtenue en CPWC, est présentée sur la figure 2.4b et on peut constater qu'elle donne l'image la plus nette des quatre méthodes.

L'approche médicale peut être utilisée pour certains types de contrôles en CND. Cependant, en l'état, elle n'est applicable qu'à l'imagerie avec le mode de propagation direct et pour un capteur au contact du milieu d'inspection. De plus, comme l'imagerie B-Scan en balayage électronique, le principe de reconstruction ligne par ligne implique que la largeur de l'image est limitée par le nombre d'éléments (cf. chapitre 1, 4.2.2). Or les capteurs utilisés en CND comprennent souvent 32 ou 64 éléments (plus rarement 128), ce qui donnerait des images de petites dimensions. D'autre part, dans le cadre de cette thèse qui s'intéresse au contrôle en immersion, la méthode doit être remaniée pour prendre en compte la présence d'une interface eau/solide entre le capteur et la zone d'intérêt. Elle doit également être applicable aux modes de propagation plus

complexes, notamment au mode demi-bond. Enfin, en présence d'une surface non plane, la méthode médicale est difficilement exploitable car la sous-ouverture et les lois de retards appliquées pour focaliser en réception doivent changer en fonction des variations de la surface complexe.

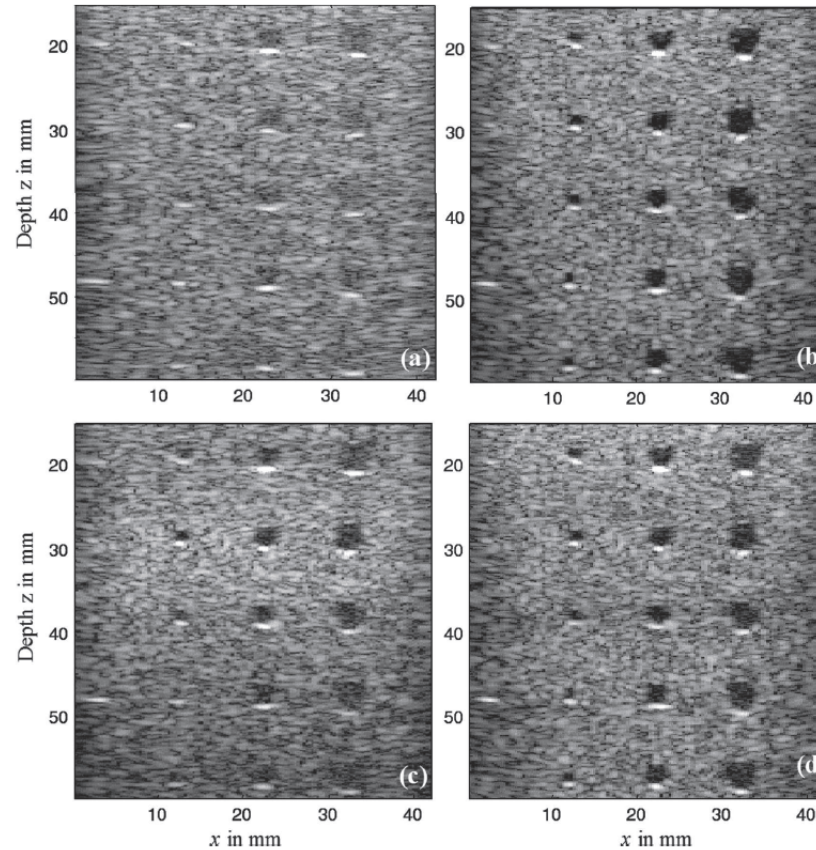


FIGURE 2.4 – Images échographiques de fantômes biologiques obtenues avec (a) une seule onde plane (SPWI), (b) 71 ondes planes (CPWC), (c) méthode balayage électronique focalisé à 30 mm de profondeur avec focalisation dynamique et (d) méthode multifocus à 4 profondeurs avec focalisation dynamique. (©MONTALDO *et al.* [32]).

2.2 Généralisation de la méthode PWI pour le CND

L'objectif de cette section est d'exposer une nouvelle méthode d'imagerie basée sur le principe d'émission d'ondes planes. La méthode PWI, consiste ici à appliquer le principe de focalisation dynamique en tous points à une acquisition réalisée avec des ondes planes. Pour un capteur de N éléments et Q ondes planes transmises dans le milieu, l'algorithme PWI s'écrit :

$$A(P) = \left| \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^N \Omega_q^e(P) W_j^r(P) s_{qj}(t_q^e(P) + t_j^r(P)) \right|, \quad (2.18)$$

où $t_q^e(P)$ est le temps mis par la q^e onde plane ($1 \leq q \leq Q$) pour atteindre le point de focalisation P , $t_j^r(P)$ est le temps de vol entre le point de focalisation et le récepteur j , $s_{qj}(t)$ est le signal analytique obtenu par la transformée de HILBERT du signal enregistré $m_{qj}(t)$, et $\Omega_q^e(P)$ et $W_j^r(P)$ sont des facteurs de pondération appliqués en émission et en réception. On remarque que l'équation 2.18 est formellement identique à celle de l'algorithme STA (cf. équation 2.1). La différence résidant dans la méthode d'acquisition, le facteur de pondération à l'émission Ω_{qj}^P et le temps de vol $t_q^e(P)$ de l'onde plane incidente jusqu'au point P .

2.2.1 Loi de retards pour émettre une onde plane

La méthode PWI appliquée au contrôle d'une pièce en immersion nécessite l'application de lois de retards pour transmettre dans le matériau des ondes planes dans les directions souhaitées. Dans le cas simple d'une surface plane, il suffit d'émettre dans l'eau une onde plane dont l'angle d'incidence α_q vérifie la relation de SNELL-DESCARTES (cf. chapitre 1, sous-section 1.6) avec l'angle de réfraction désiré β_q . Pour un capteur en immersion de N éléments (repérés par leurs abscisses X_e) et un angle d'incidence dans l'eau α_q , le retard E_e appliqué à un élément E est donné par :

$$E_e(q) = \frac{X_e \sin \alpha_q}{v} - \min_{e=1}^N \left(\frac{X_e \sin \alpha_q}{v} \right), \quad (2.19)$$

où v est la vitesse de propagation dans l'eau.

2.2.2 Imagerie en mode direct

Comme pour l'imagerie STA, la détermination des trajets aller et retour revient à calculer les coordonnées des points d'impact à la surface (I_e et I_r , cf. figure 2.5). Le point d'impact I_e peut être vu comme le point de la surface intersecté par le rayon issu du centre d'un élément du capteur. Le fait d'émettre des ondes planes permet de simplifier certains calculs. En effet, par rapport à la méthode STA où chaque onde émise dans l'eau est omnidirectionnelle (impliquant un calcul itératif des points d'impact), il suffit ici d'appliquer la relation de SNELL-DESCARTES entre les angles d'incidence et de réfraction des ondes planes. Pour un point P donné et un angle de transmission β_q dans la pièce, l'abscisse x_e du point d'impact I_e est alors donnée par :

$$x_e = X_p - (Z_p - h_0) \tan \beta_q, \quad (2.20)$$

Le temps de vol du trajet aller peut alors s'exprimer comme suit :

$$t_q^e(x_e) = \frac{x_e \sin \alpha_q + h_0 \cos \alpha_q}{v_a} + \frac{(X_p - x_e) \sin \beta_q + (Z_p - h_0) \cos \beta_q}{v_b}. \quad (2.21)$$

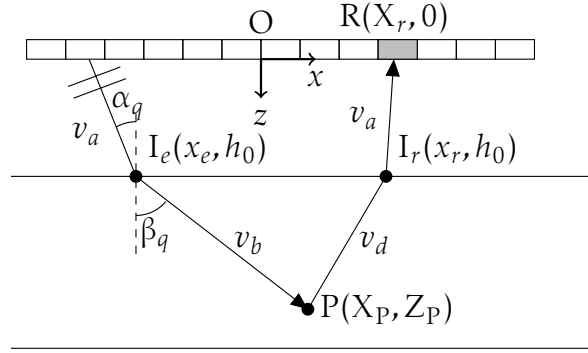


FIGURE 2.5 – Imagerie PWI en mode direct : une onde plane, transmise par un capteur placé parallèlement à la surface, se propage jusqu’au point de focalisation P en passant par la surface en I_e avant de retourner au récepteur R en passant par l’interface en I_r .

Le calcul des temps de vol retours, du point P jusqu’au capteur reste inchangé par rapport à la méthode STA (cf. sous-section 1.1).

Concernant le nombre de trajets à calculer en mode direct (avec ou sans conversion de modes), pour un point P de l’image et Q transmissions d’ondes planes, il y a $Q + N$ trajets à déterminer. En mode direct sans conversion de modes, la méthode STA requiert donc le calcul d’un plus petit nombre de temps de vol que la méthode PWI ($Q + N$ contre N). En revanche, ce n’est plus le cas lorsqu’il y a conversion de modes et, comme on le verra plus tard, en demi-bond ($Q + N$ contre $2N$).

2.2.3 Imagerie en mode demi-bond

En mode demi-bond, l’onde incidente subit, en plus de la réfraction à l’interface en I_e , une réflexion sur le fond de la pièce en B avant d’atteindre un point P de l’image (cf. figure 2.6).

En supposant un angle de transmission β_q dans la pièce et un angle de réflexion γ_q sur le fond, les abscisses des points I_e et B sont données par :

$$\begin{cases} x_b = X_p - (Z_p - h_0) \tan \gamma_q \\ x_e = x_b - h \tan \beta_q \end{cases}, \quad (2.22)$$

où h est l’épaisseur de la pièce ($h_1 = h_0 + h$). Une fois les abscisses de I_e et B connues, on calcule le temps de vol du trajet aller jusqu’au point P avec l’équation :

$$t_q^e(x_e, x_b) = \frac{x_e \sin \alpha_q + h_0 \cos \alpha_q}{v_a} + \frac{(x_b - x_e) \sin \beta_q + (h_1 - h_0) \cos \beta_q}{v_b} + \frac{\sqrt{(x_b - X_P)^2 + (h_1 - Z_P)^2}}{v_c}. \quad (2.23)$$

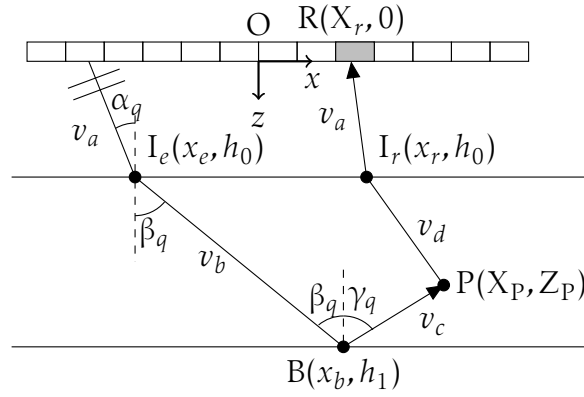


FIGURE 2.6 – Imagerie PWI en mode demi-bond : une onde plane, transmise par un capteur placé parallèlement à la surface, se propage jusqu’au point de focalisation P après réfraction à la surface en I_e et réflexion sur le fond de pièce en B , avant d’aller au récepteur R en passant par l’interface en I_r .

Il est à noter qu’en demi-bond, le nombre de temps de vol à calculer reste identique par rapport au mode direct ($Q + N$). Par conséquent, si $Q \ll N$, alors l’imagerie PWI devrait permettre d’augmenter les cadences d’imagerie par rapport à la méthode STA. Il y aura, en effet, moins de tirs à réaliser, moins de signaux à stocker et moins de temps de vol et de sommes à calculer pour produire une image.

Un récapitulatif des grandeurs caractéristiques (nombre de tirs à réaliser, de signaux à enregistrer, de sommes à calculer pour chaque point de l’image) des méthodes STA et PWI est présenté dans le tableau 2.1.

		STA	PWI
Nombre de tirs		N	Q
Nombre de signaux à stocker		$N \times N$	$Q \times N$
Nombre de signaux acquis (\forall modes)		$N \times N$	$Q \times N$
Nombre de temps de vol	direct sans conversion	N	$Q + N$
	direct avec conversion	$2N$	$Q + N$
	demi-bond sans conversion	$2N$	$Q + N$
	demi-bond avec conversion	$2N$	$Q + N$

TABLE 2.1 – Récapitulatif des grandeurs caractéristiques des méthodes STA et PWI (N est le nombre d’éléments du capteur et Q le nombre d’ondes planes émises).

2.2.4 Zone effective

Comme indiqué ci-dessus, l'algorithme PWI peut potentiellement réduire le nombre de sommes à effectuer par rapport à la méthode STA, et donc le temps de calcul des images. Dans la méthode STA, les éléments rayonnent dans toutes les directions de l'espace, et la somme des $N \times N$ signaux $s_{ij}(t)$ doit être calculée en tous points de la zone d'intérêt et pour tous les tirs. Au contraire, avec la méthode PWI, une onde plane n'insonifie qu'une partie de la zone d'intérêt (cf. figure 2.7), appelée « zone effective », qui dépend de l'angle de transmission β_q dans la pièce. Lors du calcul de l'image PWI, les points calculés sont ceux qui sont inclus dans cette zone, les autres ne l'étant pas (amplitude nulle). Le principe de calcul par zone effective diminue le nombre de points de calcul, et s'avère particulièrement efficace quand la zone imagée est plus grande que l'ouverture du capteur.

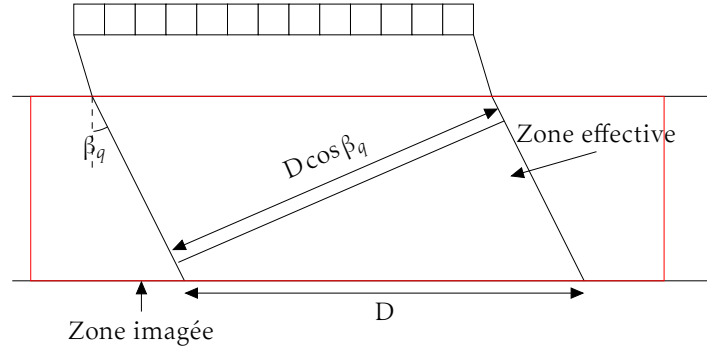


FIGURE 2.7 – Zone effective pour un angle β_q .

La largeur de la zone effective est $D \cos \beta_q$, avec D l'ouverture du capteur et β_q l'angle de transmission dans la pièce pour le tir n° q . Ceci implique que lorsque l'angle de transmission augmente, la largeur de la zone effective décroît.

Il est à noter qu'en imagerie conventionnelle (B-Scan, S-Scan, ...), des lois d'amplitudes, appelées aussi lois d'apodisation, sont souvent appliquées en émission et/ou en réception, en particulier pour réduire la contribution des lobes secondaires et des effets de diffraction par les bords du capteur. En général, la même loi est appliquée pour tous les tirs, donc quelle que soit la direction de focalisation dans l'image [40]. En imagerie point par point, les facteurs d'apodisation sont représentés par les facteurs $\Gamma_i^e(P)$ et $W_j^r(P)$ (cf. équation 2.1) pour la méthode STA, et $\Omega_q^e(P)$ et $W_j^r(P)$ pour la méthode PWI (cf. équation 2.18). À la différence de l'imagerie conventionnelle, ces facteurs de pondération peuvent dépendre du point de focalisation, et donc prendre des valeurs différentes pour chaque point de l'image. Cependant, dans la suite de ce chapitre, ils ne sont pas utilisés. En effet, l'objectif étant d'utiliser ces méthodes en immersion avec le mode demi-bond, les facteurs de pondération devraient prendre en compte les coefficients de réflexion/transmission aux interfaces, ce qui augmenterait significativement le nombre d'opérations pour obtenir une image. Ces facteurs de pondération seront uniquement utilisés dans le chapitre 3 pour la mesure de surface avec l'algorithme STA.

3 Évaluation expérimentale de l'imagerie PWI

Dans cette section, les méthodes STA et PWI sont appliquées à plusieurs configurations d'inspection : un capteur au contact, puis un capteur en immersion, et les résultats obtenus sont analysés et comparés. Les expériences réalisées avec le capteur au contact permettent de valider la méthode PWI dans un cas simple (pas de réfraction, mode direct). Dans un premier temps, les algorithmes de reconstruction STA et PWI (calcul des trajets et sommation cohérentes) sont appliqués à un même jeu de données expérimentales STA. L'ensemble des signaux enregistrés pour l'imagerie STA constitue la matrice des réponses impulsionnelles inter-éléments $\mathbf{K}(t)$ (cf. chapitre 1, sous-section 4.5), et il est en effet possible de « synthétiser » une acquisition PWI en appliquant des retards et des sommes à ces réponses impulsionnelles. Cela permet d'étudier l'influence respective du mode d'émission et de l'algorithme d'imagerie. Les paramètres influents de l'imagerie en ondes planes, comme la zone effective ou le pas angulaire entre deux émissions successives sont également étudiés. Les deux méthodes sont ensuite mises en œuvre en immersion, en partant du cas simple d'un capteur fixe au-dessus d'une pièce présentant des défauts volumiques (imagerie en mode direct), au cas d'un balayage mécanique associé à l'imagerie multimodes (association du mode direct pour imager le fond de pièce et du mode demi-bond pour imager des défauts plans verticaux). Cette étude constitue la première étape avant de traiter des pièces complexes en immersion (cf. chapitre 3).

3.1 Dispositif expérimental

Cette première sous-section présente les moyens expérimentaux utilisés pendant cette thèse. La sous-section 3.1 présente un exemple de montage expérimental.

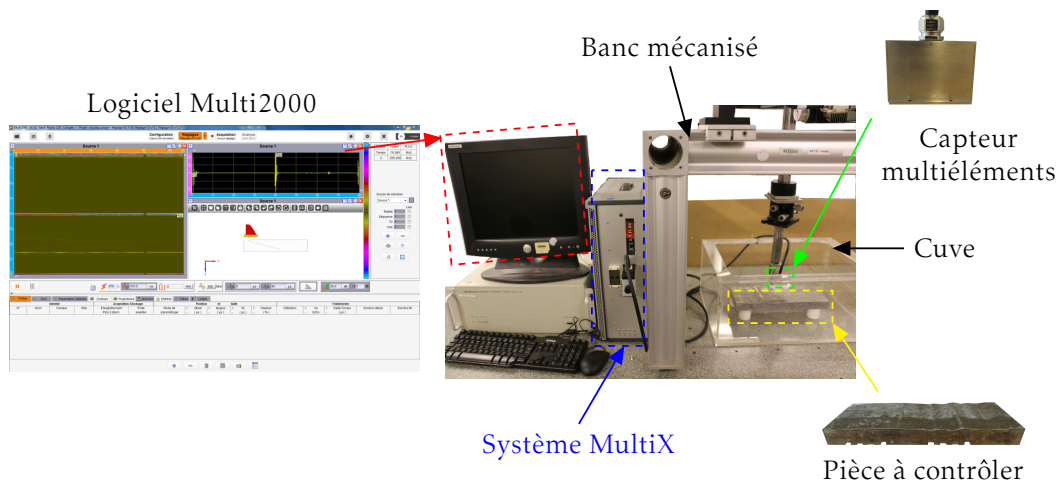


FIGURE 2.8 – Montage expérimental utilisé pour réaliser les acquisitions STA et PWI.

Les acquisitions ont été réalisées à l'aide d'un banc mécanique permettant un réglage précis de la position du capteur par rapport à la pièce inspectée. Les capteurs sont

utilisés au contact de la pièce en utilisant du gel comme couplant acoustique, ou en immersion en cuve. Ce sont des traducteurs, de fréquence centrale 2 MHz ou 5 MHz, comportant 64 ou 128 éléments et fournis par la société Imasonic. Le système électronique utilisé pour la génération et la réception des signaux ultrasonore est un système multivoies, fabriqué par la société M2M, qui permet le pilotage de 128 éléments. Il excite les éléments du capteur en appliquant un signal électrique de forme créneau. En réception, le signal est échantillonné à 100 MHz. Le système est piloté par le logiciel Multi2000 et les données sont transférées grâce à une liaison USB2. Les images sont obtenues par post-traitement des signaux acquis dans Matlab.

3.2 Évaluation de la méthode PWI pour un capteur au contact

Dans le cas où le capteur est placé au contact de la pièce, les équations des section 1 et sous-section 2.2 sont simplifiées. En effet, le trajet dans l'eau n'est plus à prendre en compte. Comme l'abscisse x_e du point d'impact I_e est confondue avec le centre de l'émetteur, l'expression d temps de vol aller en mode direct devient alors, pour l'algorithme PWI :

$$t_q^e = \frac{(X_p - X_e) \sin \beta_q + Z_p \cos \beta_q}{v_b}. \quad (2.24)$$

De même, comme $x_r = X_r$, il n'est plus nécessaire d'appliquer l'algorithme itératif de descente de gradient pour calculer le temps de vol retour, qui est maintenant donné par :

$$t_j^r = \frac{\sqrt{(X_r - X_p)^2 + Z_p^2}}{v_b}. \quad (2.25)$$

Le calcul des temps vol pour l'algorithme STA est également simplifié et il sont déterminés grâce à l'équation suivante :

$$t_i^e = \frac{\sqrt{(X_p - X_e)^2 + (Z_p - h_0)^2}}{v_b}. \quad (2.26)$$

3.2.1 Validation de l'algorithme PWI

Dans le but de comparer les deux méthodes, il convient tout d'abord de comparer les performances respectives des algorithmes STA et PWI, indépendamment de la méthode d'acquisition. Pour ce faire, une acquisition STA a été réalisée en positionnant un capteur sur une pièce en acier ferritique comportant des défauts volumiques artificiels (trous latéraux de 2 mm de diamètre, cf. figure 2.9). Le capteur est composé de 128 éléments (pas interéléments de 0,8 mm) et de fréquence centrale 2 MHz.

L'acquisition STA fournit la matrice des réponses impulsionnelles inter-éléments $\mathbf{K}(t)$, et cette matrice permet de synthétiser les signaux d'une acquisition PWI. Une façon de procéder est d'utiliser la matrice de transfert $\mathbf{K}(\omega)$, obtenue par transformée

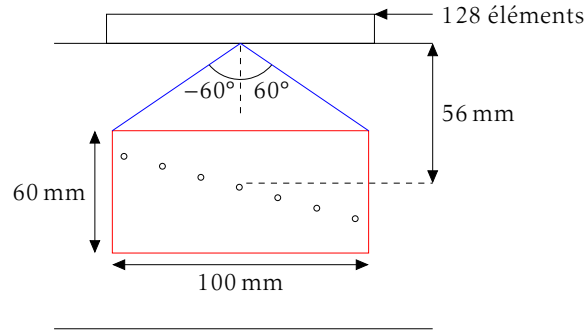


FIGURE 2.9 – Imagerie PWI au contact avec le mode direct : un capteur comprenant 128 éléments posé sur un bloc d'acier ferritique comprenant une série de trous latéraux (2 mm de diamètre) régulièrement espacés.

de FOURIER temporelle de $\mathbf{K}(t)$. Considérons le vecteur $\mathbf{M}_\beta(\omega)$, de dimension $N \times 1$, contenant les signaux reçus par les N éléments du capteur, pour un angle de transmission β . Les éléments de ce vecteur sont donnés par la relation suivante :

$$\mathbf{M}_\beta(\omega) = \mathbf{K}(\omega) \exp(-j\omega \boldsymbol{\tau}_\beta), \quad (2.27)$$

où $\boldsymbol{\tau}_\beta$ est un vecteur de dimension $N \times 1$ contenant les retards associés à l'angle β (cf. équation 2.19). Le vecteur $\mathbf{M}(t)$ est finalement obtenue par une transformée de FOURIER inverse. Les signaux enregistrés lorsqu'une onde plane est émise à -10° (figure 2.10a) sont comparés à ceux synthétisés en appliquant des retards et sommes à la matrice $\mathbf{K}(t)$ (cf. figure 2.10b). On observe qu'ils sont identiques pour cet angle d'incidence (et tous les autres angles compris entre -60 et 60°). On peut donc calculer des images STA et PWI en utilisant le même jeu de données expérimentales, c'est-à-dire $\mathbf{K}(t)$ et ainsi comparer les algorithmes (calcul des trajets et sommation cohérente des signaux) indépendamment du mode d'acquisition des données.

La zone d'intérêt (\square) est de 100 mm par 60 mm (100 mm correspondant à la largeur du capteur). Elle est centrée sur le trou situé à 56 mm de profondeur. Pour couvrir cette zone, 121 ondes planes sont synthétisées de -60 à 60° , avec un pas angulaire de 1° . Le nombre de tirs pour PWI (121) est donc proche de celui de l'acquisition STA (128). La figure 2.11 présentent les images données par les algorithmes STA et PWI après synthétisation des ondes planes. On peut voir qu'elles sont très similaires. Elles peuvent être séparées en deux régions distinctes en fonction de la nature et de l'origine du bruit. La première région, au-dessus des défauts, est caractérisée par du bruit électronique (situé sous les -50 dB sur les images STA et PWI, mais visible sur les B-Scans voies). Dans la seconde région, sous les défauts, le bruit correspond à des artefacts créés par l'algorithme d'imagerie. Il est possible de montrer, par des simulations, que ces artefacts proviennent d'échos correspondants à des trajets en mode LdT repositionnés à des temps de vol calculés en mode LdL . Nous reviendrons plus en détail sur ce phénomène en 3.3.2, dans le cas d'une entaille, pour lequel ces artefacts peuvent gêner la détection et la caractérisation du défaut.

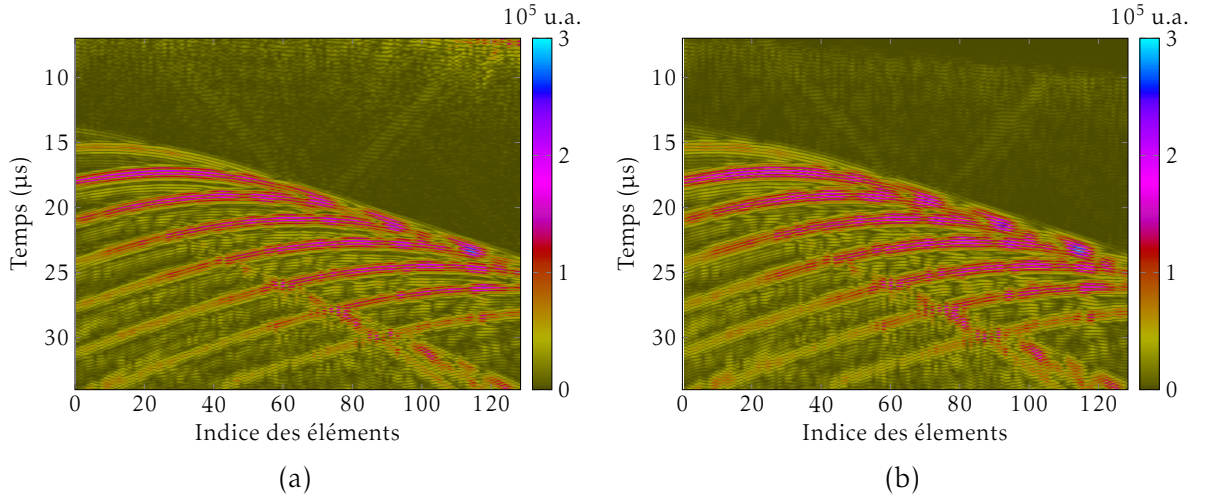


FIGURE 2.10 – Synthétisation des signaux d’une onde plane à partir des signaux de l’acquisition STA : (a) signaux enregistrés lorsqu’une onde plane est émise à -10° et (b) signaux synthétisés à partir de $\mathbf{K}(t)$ avec le même angle d’incidence.

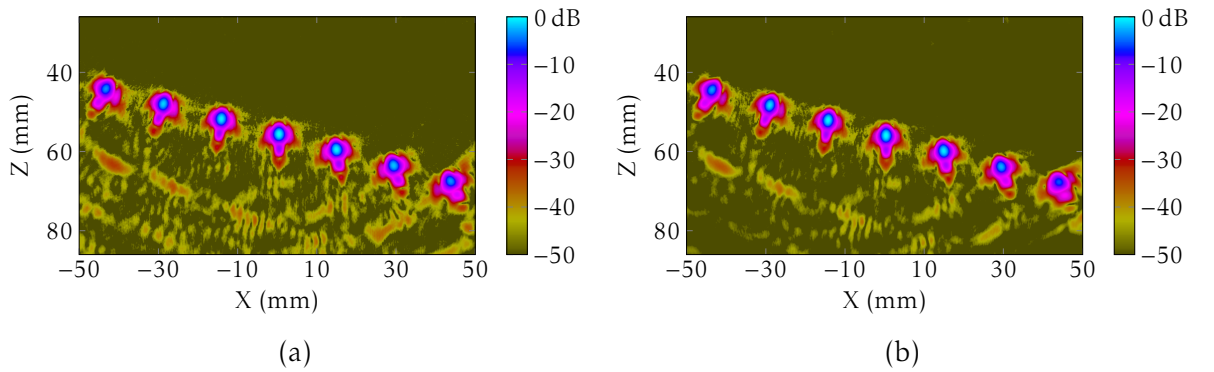


FIGURE 2.11 – Validation de l’algorithme PWI : images calculées en appliquant les algorithmes (a) STA et (b) PWI au même jeu de données expérimentales.

3.2.2 Influence et apport de la zone effective

Cette sous-section illustre le principe de zone effective, lié à l’extension finie des ondes planes émises par un capteur, et étudie son influence sur la qualité d’image et sur le nombre de calculs à effectuer pour obtenir une image. Pour cela, une acquisition PWI a été réalisée avec la configuration expérimentale précédente et décrite sur la figure 2.9. La plage angulaire couvre entièrement la zone image de manière à ce que chaque point de l’image soit correctement insonifié (-60° à 60° par pas de 1°).

La construction progressive d’une image PWI en fonction de l’angle d’incidence est illustrée sur la figure 2.12 (le trait blanc matérialise la limite de la zone effective). On observe que plus l’angle est fort, plus la zone effective est réduite ; autour de 0° ,

la zone correspond à la taille de l'image. On note également que plus le nombre de tirs augmente, plus le RSB s'améliore.

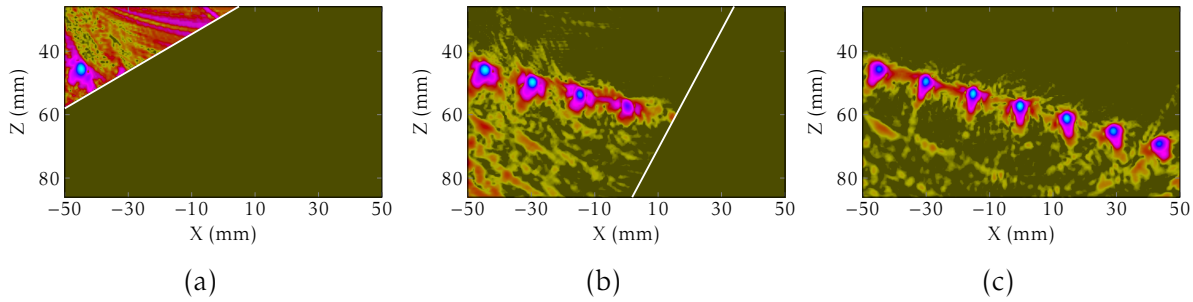


FIGURE 2.12 – Évolution de l'image PWI en fonction du nombre d'émissions : (a) une onde plane (-60°), (b) 31 ondes planes (-60 à -30°) et (c) 121 ondes planes (-60 à 60°).

L'image obtenue à l'issue des 121 tirs (cf. figure 2.12c) est comparée avec l'image calculée sans zone effective (cf. figure 2.13b).

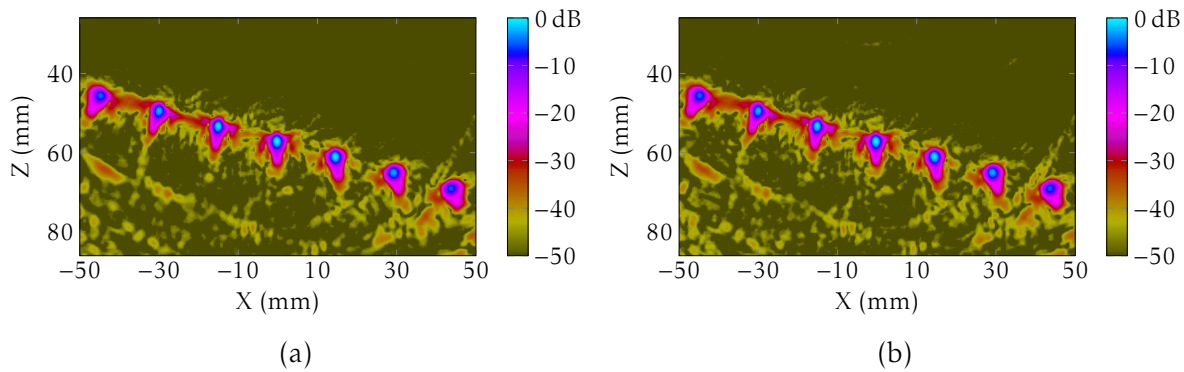


FIGURE 2.13 – Influence de la zone effective : images PWI d'une série de défauts artificiels (trous latéraux) dans un bloc d'acier ferritique (a) en appliquant le principe de zone effective et (b) sans optimisation.

Le nombre de sommes calculées passe environ de $3,7 \times 10^8$ (sans zone effective) à $2,4 \times 10^8$ (avec zone effective), soit une diminution de presque 35 %. On observe que les deux images sont identiques. Ceci montre que le calcul par zone effective, même dans le cas où la zone d'intérêt est de la taille du capteur, réduit significativement le nombre d'opérations à effectuer sans dégrader l'image finale. Le calcul par zone effective est d'autant plus intéressant que l'image est grande par rapport à l'ouverture du capteur.

3.2.3 Influence du pas angulaire

Il s'agit ici de déterminer dans quelle mesure il est possible de réduire le nombre d'ondes planes transmises, tout en gardant une qualité d'image équivalente à celle donnée par l'imagerie STA. Dans ce but, une étude de l'influence du pas angulaire

(c'est-à-dire l'angle entre deux ondes planes successives) sur le RSB et la résolution spatiale a été réalisée afin de trouver un compromis entre qualité d'image et réduction du nombre d'émissions.

Lors d'une acquisition PWI, tous les éléments sont exploités à chaque tir ultrasonore, tandis qu'ils sont excités individuellement pour réaliser une acquisition STA. Les ondes transmises en imagerie PWI sont donc caractérisées par des amplitudes plus importantes. Pour comparer les performances des deux méthodes, toutes choses égales par ailleurs, il est donc nécessaire de compenser cette différence d'amplitude en augmentant le gain de pré-amplification des signaux durant l'acquisition STA. La valeur du gain peut être déterminée en simulation, en comparant le champ émis par un seul élément (onde cylindrique) avec celui émis par tous les éléments excités simultanément (onde plane à 0°). Ces simulations ont été réalisées avec le logiciel CIVA pour un capteur au contact sur un bloc d'acier (cf. figure 2.9). Pour chaque cas, l'amplitude maximale du champ a été relevée le long de l'axe Oz et les amplitudes obtenues sont affichées sur la figure 2.14.

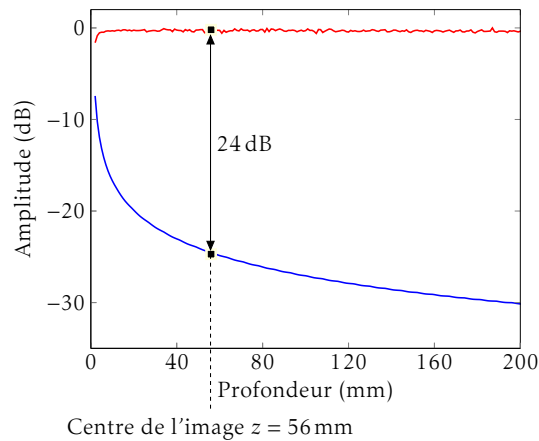


FIGURE 2.14 – Amplitude maximale du champ le long de l'axe central d'un capteur au contact, pour une onde cylindrique (—), et pour une onde plane à 0° (—).

L'onde émise par un seul élément décroît en $1/\sqrt{z}$ du fait de l'étalement cylindrique, alors que l'onde plane reste quasi constante (cf. chapitre 1, sous-section 1.4). À la profondeur du centre de la zone imagée (autour de $z = 56 \text{ mm}$), on constate que la différence d'amplitude entre les champs est d'environ 24 dB. Par conséquent, Pour étudier l'influence du pas angulaire dans PWI, le gain d'acquisition a été augmenté de 24 dB lors de l'acquisition STA. Comme précédemment, la plage angulaire est choisie entre -60° et 60° avec un pas angulaire de 1° . Les nombres de tirs ultrasonores pour PWI ($Q = 121$) et STA ($N = 128$) sont donc très proches.

Les figures 2.15a et 2.15b montrent qu'avec des nombres de tirs équivalents, les deux méthodes donnent des résultats quasi identiques. Dans la partie haute de l'image, aucun bruit au-dessus de -50 dB n'est visible, tandis que dans la partie basse, des artéfacts sont présents à environ -35 dB . Les positions, formes et amplitudes des échos des défauts sont très proches.

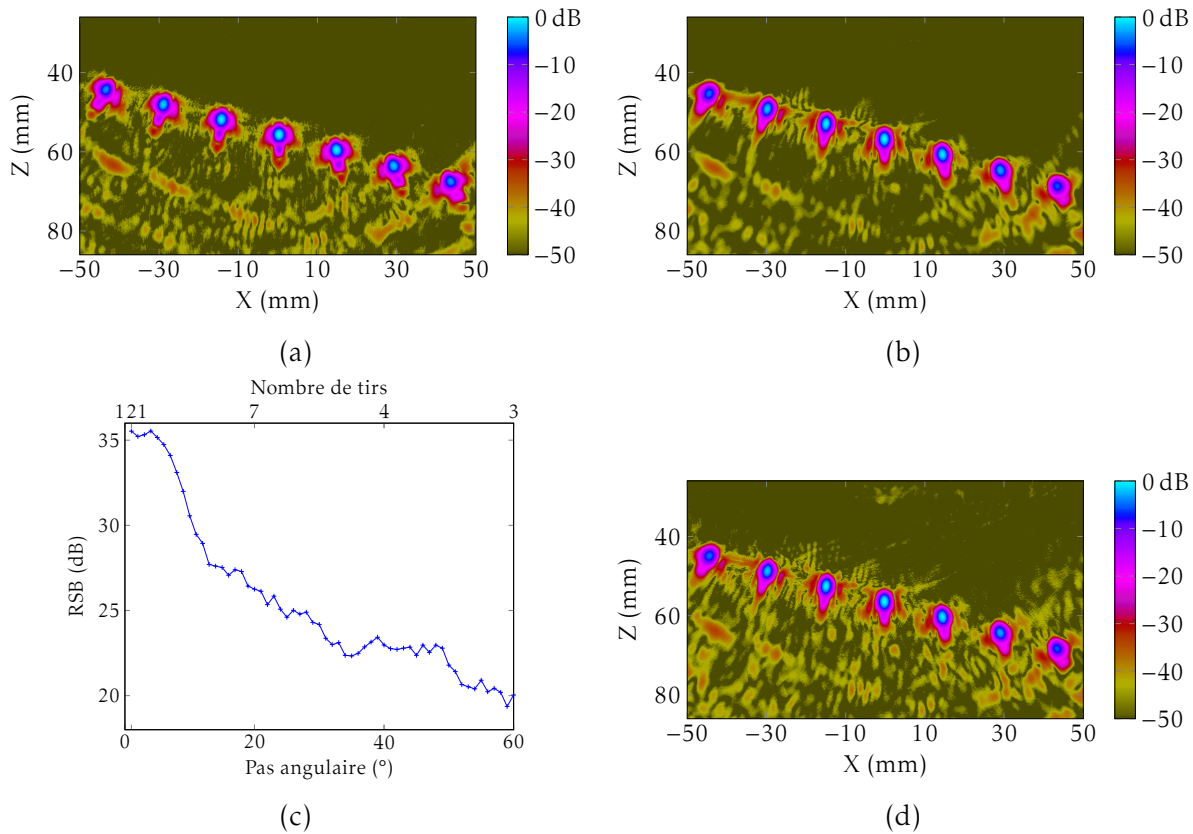


FIGURE 2.15 – Imagerie PWI au contact : (a) image STA (128 transmissions), (b) image PWI avec 121 transmissions (-60° à 60° , pas de 1°), (c) évolution du RSB en fonction du pas angulaire et (d) image PWI avec 41 transmissions (-60° à 60° , pas de 3°).

Les courbes échodynamiques affichées sur la figure 2.16 permettent une comparaison plus quantitative. On rappelle que les courbes échodynamiques représentent le maximum de l'amplitude de l'image relevé sur l'axe X ou Z (cf. chapitre 1, sous-section 4.1).

On constate que les positions (suivant X et Z) des échos des défauts sont très proches dans les deux cas. La résolution spatiale à -6 dB (cf. chapitre 1, sous-section 3.2) des deux méthodes est équivalente car la largeur des échos des défauts reste identique jusqu'à -20 dB. Le niveau de bruit dans le haut de l'image est légèrement plus élevé pour la méthode STA (+2 dB), cependant cette valeur est de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesure. Ces images prouvent que, pour les mêmes nombres de tirs et dans des matériaux où le bruit de structure et l'atténuation sont peu significatifs, les méthodes STA et PWI donnent les mêmes valeurs de RSB et de résolution spatiale, en tous points de la zone d'intérêt.

Comme déjà mentionné en début de chapitre, la méthode PWI devrait permettre de minimiser le nombre de transmissions, tout en conservant une qualité d'image équivalente à l'imagerie STA. Pour assurer une bonne insonification de tous les points

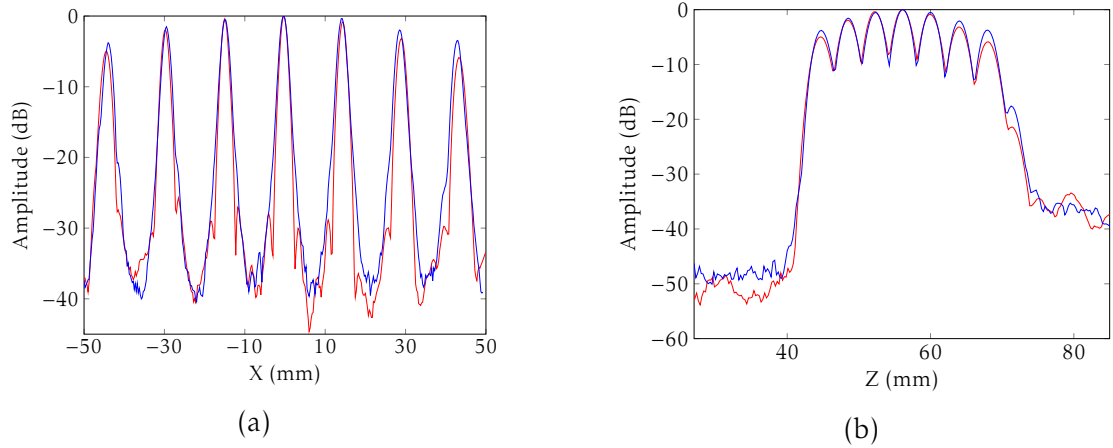


FIGURE 2.16 – Influence du pas angulaire pour un capteur au contact : courbe échodynamique selon la direction (a) X et (b) Z. (–) : PWI (-60 à 60° , pas de 1°), (—) : STA.

de l'image, la plage angulaire doit couvrir entièrement la zone d'intérêt. Par conséquent, la réduction du nombre de tirs d'une acquisition PWI revient à augmenter le pas angulaire. Pour évaluer l'influence du pas angulaire sur le RSB, une série d'images PWI a été calculée à partir d'une même acquisition (121 tirs, pas angulaire de 1°), en éliminant progressivement les tirs pour faire varier le pas angulaire. Pour calculer le RSB, le niveau de bruit est estimé en mesurant le maximum d'amplitude dans une image du trou situé à 56 mm de profondeur, après retrait de l'écho du défaut.

La figure 2.15c montre l'évolution du RSB en fonction du pas angulaire entre deux ondes planes consécutives. La plage angulaire est fixe ($[-60^\circ; 60^\circ]$) et le pas varie entre 1° (121 ondes planes) et 60° (3 ondes planes). Comme attendu, le RSB décroît lorsque le pas angulaire augmente mais il reste à peu près constant pour un pas angulaire allant de 1 à 5° . Ces résultats concordent avec ceux obtenus par MONTALDO *et al.* [32], qui montrent qu'environ 40 ondes planes sont nécessaires pour obtenir le même contraste qu'avec la méthode multifocus (cf. figure 2.4d).

Les figures 2.15b et 2.15d démontrent que les images PWI réalisées avec 41 (pas de 3°) et 121 (pas de 1°) ondes planes sont similaires. On constate que le niveau de bruit est légèrement supérieur pour l'image avec le pas de 3° , mais il reste aux alentours de -50 dB. Ces observations sont confirmées par les superpositions de courbes échodynamiques sur la figure 2.17. On note que la largeur des échos reste la même quand le pas angulaire passe de 1 à 3° (cf. figure 2.17a), alors que le niveau de bruit suivant augmente légèrement de 3 à 4 dB dans la partie haute de l'image (cf. figure 2.17b).

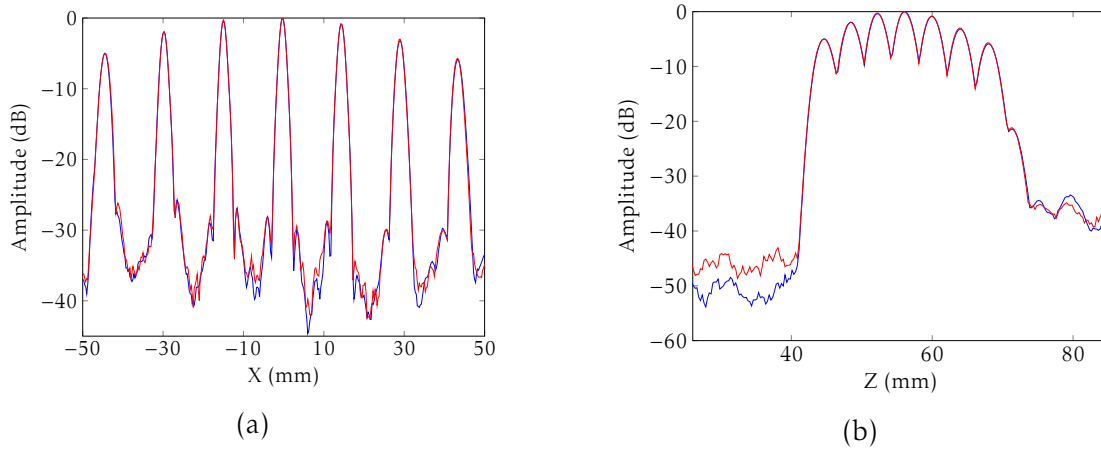


FIGURE 2.17 – Influence du pas angulaire pour un capteur au contact : courbe échodynamique selon la direction (a) X et (b) Z. (–) : PWI (–60 à 60°, pas de 1°), (—) : PWI (–60 à 60°, pas de 3°).

En conclusion, la possibilité de réduire sensiblement le nombre de transmissions (ici, d'un facteur 3), sans dégrader l'image, a été mise en évidence. Il est à noter que l'on s'intéresse ici au nombre d'ondes à transmettre pour garder un RSB maximal (50 dB). Cependant, en CND, un RSB de 20 dB reste une valeur acceptable pour les contrôles, ce qui permet de réduire de manière drastique le nombre de transmissions (≈ 3 , cf. figure 2.15c).

3.2.4 Apport de l'émission en ondes planes pour un milieu atténuant

On a montré plus haut que les méthodes STA et PWI fournissent les mêmes images à 2 MHz dans le cas d'un acier ferritique (cf. figure 2.15). Les effets de l'atténuation et du bruit de structure sont négligeables à cette fréquence pour ce type de matériau. Pour évaluer l'apport de l'émission d'ondes planes, une seconde expérience a été réalisée avec un capteur au contact d'un échantillon de polyéthylène haute densité (PEHD) caractérisé par une forte atténuation (cf. figure 2.18).

Ce matériau tend à remplacer les aciers des tubes d'acheminement des fluides industriels (gaz, eau, pétrole), et des défauts critiques peuvent apparaître au niveau des soudures « bout à bout ». Le matériau est de type PE80 (sur une échelle allant de 20 à 100 en fonction de la densité) et l'atténuation croît de 0,5 à 1,5 dB.mm⁻¹, selon une loi en puissance entre 0,5 et 5 MHz [41]. Les acquisitions STA et PWI ont été réalisées avec un capteur composé de 64 éléments fonctionnant autour de 2 MHz sur un échantillon de PEHD de 50 mm d'épaisseur comprenant un trou à fond plat de 15 mm de hauteur et 1 mm de diamètre.

Les acquisitions ont été réalisées en réglant la tension d'excitation des éléments et le gain de pré-amplification des signaux au maximum des possibilités de l'appareil (respectivement 70 V et 70 dB). La plage angulaire de l'acquisition PWI est comprise entre –30 et 30° avec un pas angulaire de 1°. Le nombre de tirs est donc équivalent

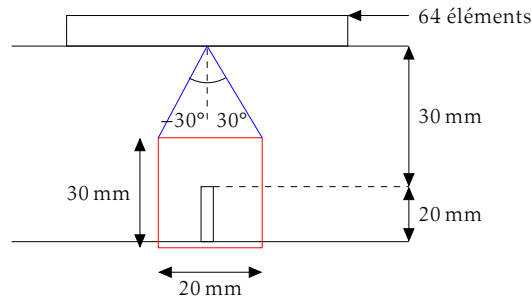


FIGURE 2.18 – Apport de la méthode PWI dans le cas d'un matériau atténuant : un capteur de 64 éléments est placé au contact d'un échantillon PEHD. Un défaut artificiel (trou à fond plat de 1 mm de diamètre) est localisé sous le capteur.

à celui mis en œuvre dans la méthode STA (64 tirs pour 64 éléments). Les deux méthodes ont été appliquées dans les mêmes conditions, pourtant les images STA et PWI affichées sur la figure 2.19 sont très différentes. L'image STA présente un niveau de bruit très élevé, avec un écho de défaut quasiment invisible ($\text{RSB} < 5 \text{ dB}$). En revanche, celle réalisée en PWI montre un écho de défaut bien marqué avec un RSB acceptable (20 dB). Ceci est non seulement dû à l'amplitude très inférieure des ondes émises lors de l'acquisition STA, mais aussi à l'étalement cylindrique de ces ondes, qui s'ajoute à l'atténuation du matériau. Cette expérience montre bien que l'utilisation de la méthode PWI est prometteuse en présence d'une forte atténuation visco-élastique.

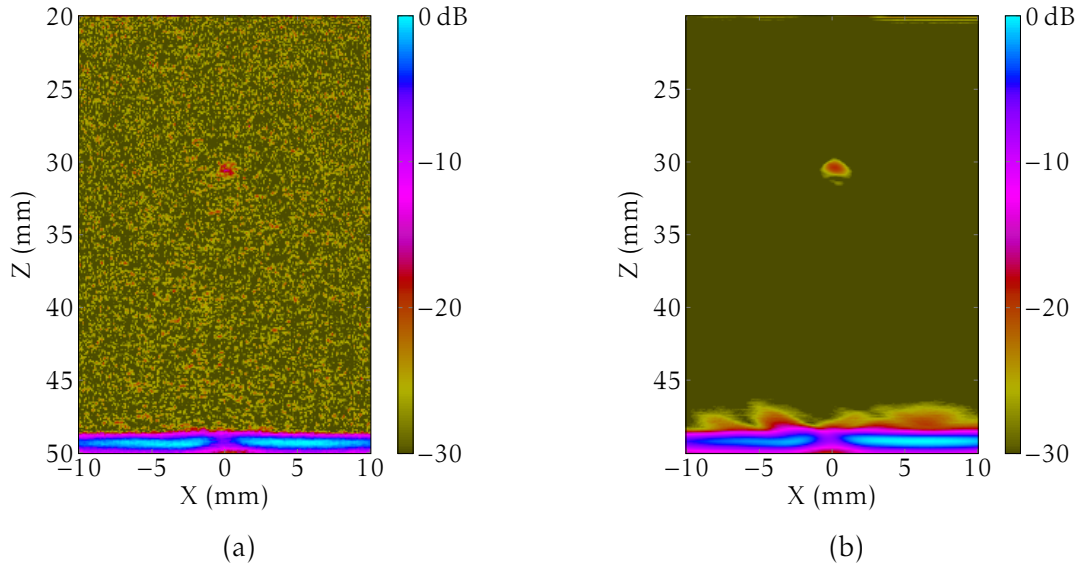


FIGURE 2.19 – Apport de la méthode PWI dans le cas d'un matériau atténuant : image d'un trou à fond plat dans un tube en PEHD atténuant par la méthode : (a) STA et (b) PWI (-30° à 30° , pas de 1°).

3.3 Application de la méthode PWI pour un capteur en immersion

La méthode PWI a été étudiée jusqu'ici avec un capteur au contact et en utilisant uniquement le mode de propagation direct. Dans ce cas simple, l'imagerie médicale (algorithme « ligne par ligne ») pourrait tout à fait convenir et donner des résultats similaires aux nôtres (algorithme « point par point »). On s'intéresse maintenant à des configurations de contrôle en immersion pour lesquelles l'interface eau/solide doit être prise en compte dans la méthode d'acquisition (calcul des lois de retards) et dans l'algorithme de reconstruction (calcul des trajets ultrasonores). Les premiers résultats PWI en mode de propagation demi-bond sont également présentés.

3.3.1 Imagerie en mode direct

Dans cette expérience, la pièce et le capteur sont immergés dans de l'eau qui agit comme couplant. La distance entre la sonde et la surface de la pièce est de 30 mm, ce qui assure qu'aucun écho de surface n'interfère avec les échos des défauts.

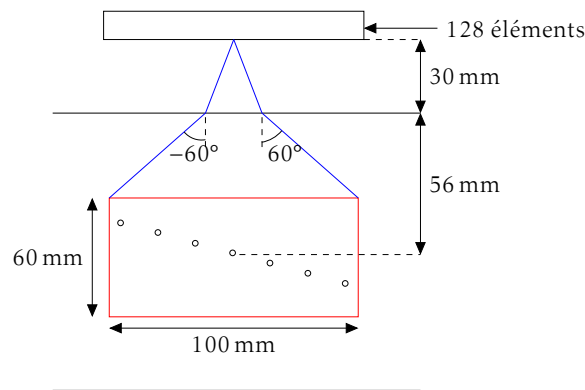


FIGURE 2.20 – Imagerie PWI en immersion en mode direct : un capteur de 128 éléments est placé en immersion à 30 mm de la surface de la pièce en acier. Des trous latéraux (2 mm de diamètre) sont présents dans le bloc.

En dehors de l'immersion, le capteur, la pièce, la position et les dimensions de la zone d'intérêt sont les mêmes que dans l'expérience au contact (cf. figure 2.20) et le gain de pré-amplification de l'acquisition STA a été corrigé de la même manière. Comme en 3.2.3, on compare les images STA et PWI (cf. figures 2.21a et 2.21b) avec des nombres de tirs proches (128 et 121).

On note la présence de bruit incohérent dans la partie supérieure des images (principalement du bruit électronique), tandis que les artéfacts de reconstruction sont visibles dans la partie basse. L'apparition de ce bruit incohérent peut être imputée à la perte d'amplitude des ondes au passage de l'interface. En effet, la différence d'impédance entre l'eau et l'acier étant importante ($Z_{acier} \approx 40 \times 10^6 \text{ Pa.s.m}^{-1}$, $Z_{eau} \approx 1,5 \times 10^6 \text{ Pa.s.m}^{-1}$), le coefficient de réflexion est proche de 1 (cf. chapitre 1, sous-section 1.6). Les courbes échodynamiques (cf. figure 2.22) confirment que les résultats sont quasi identiques à ceux observés au contact.

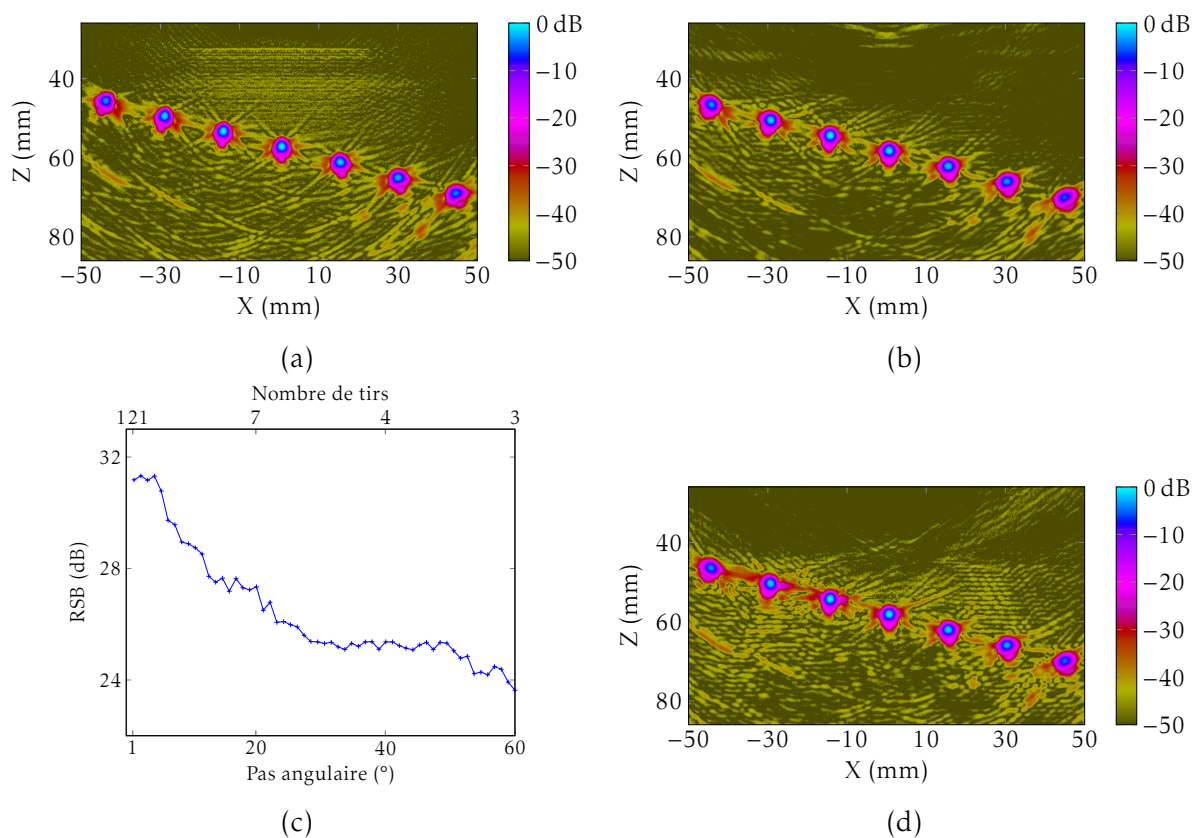


FIGURE 2.21 – Image PWI en immersion : (a) image STA (128 transmissions), (b) image PWI avec 121 transmissions (-60° à 60° , pas de 1°), (c) évolution du RSB en fonction du pas angulaire et (d) image PWI avec 41 transmissions (-60° à 60° , pas de 3°).

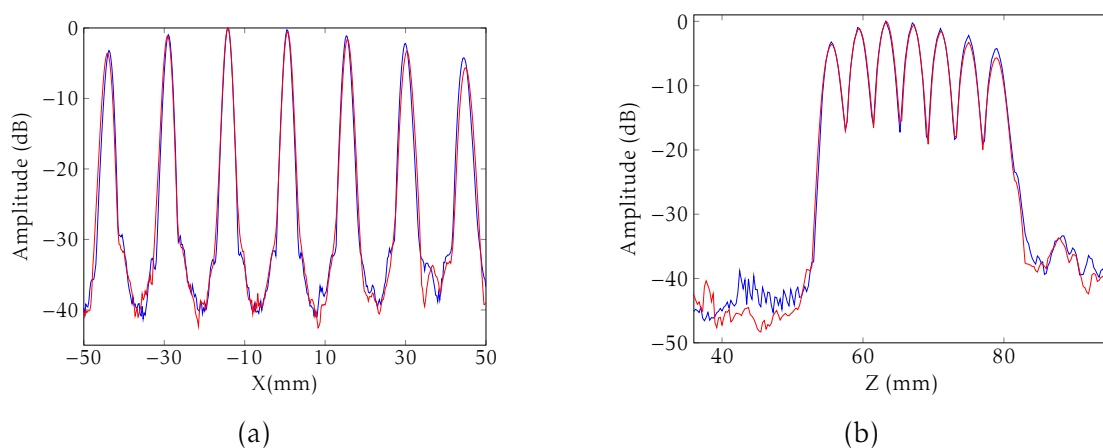


FIGURE 2.22 – Influence du pas angulaire pour un capteur en immersion : courbe échodynamique selon la direction (a) X et (b) Z. (—) : PWI (-60° à 60° , pas de 1°), (---) : STA.

Cette première comparaison confirme que la méthode développée pour l'immersion (calcul des lois de retards et des trajets ultrasonores) fonctionne correctement et que les résultats obtenus avec la méthode PWI sont au moins aussi satisfaisants qu'avec la méthode STA.

Comme dans la sous-section 3.2.3, l'influence du pas angulaire sur le RSB a été étudiée. De même qu'au contact, le RSB diminue lorsque le pas entre deux ondes successives augmente (cf. figure 2.21c). De 1 à 4°, il reste approximativement constant avant de décroître rapidement. Dans cette configuration également, une quarantaine d'ondes planes est nécessaire pour atteindre le RSB maximal. Une image PWI a donc été réalisée en gardant la plage angulaire fixe (-60 à 60°) mais en utilisant un pas angulaire de 3° , ce qui correspond à l'émission de 41 ondes. Le résultat figure 2.21d peut être comparé à l'image obtenue avec 121 tirs (cf. figure 2.21b). De manière analogue à la configuration au contact, on constate une hausse du niveau de bruit lorsque l'on augmente le pas angulaire, mais il reste en deçà de -35 dB. Ceci est confirmé par les courbes échodynamiques tracées figure 2.23

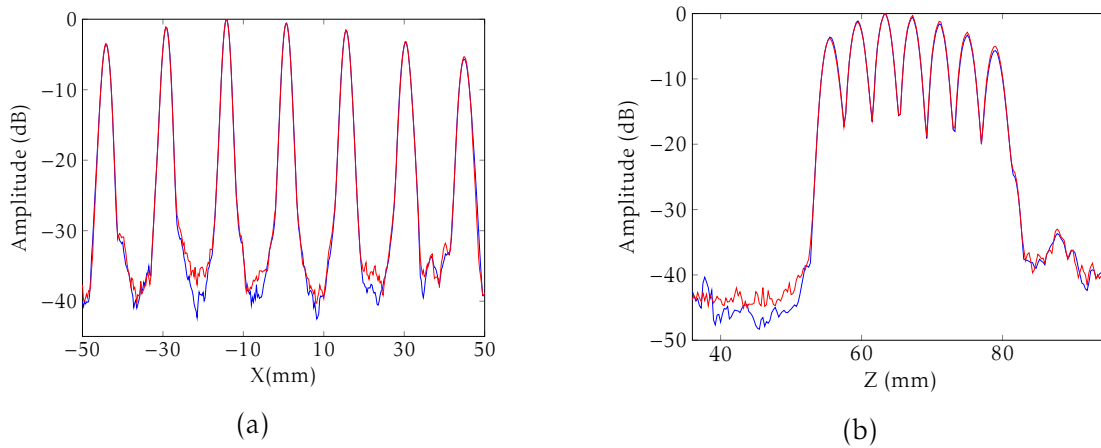


FIGURE 2.23 – Influence du pas angulaire pour un capteur en immersion : courbe échodynamique selon la direction (a) X et (b) Z. (–) : PWI (-60 à 60° , pas de 1°), (–) : PWI (-60 à 60° , pas de 3°).

Les résultats de cette section montrent que l'immersion du capteur influe peu sur la qualité de l'image (STA ou PWI).

La ressemblance des images STA et PWI sur les figures 2.21b et 2.21d valide l'algorithme dans le cas d'un capteur en immersion et d'une reconstruction d'image en mode direct. On s'intéresse maintenant à l'imagerie avec le mode de propagation demi-bond pour caractériser des défauts de type fissures.

3.3.2 Imagerie en mode demi-bond

Pour valider l'algorithme PWI en demi-bond et comparer ses performances par rapport à la méthode STA, on considère la nouvelle configuration expérimentale décrite sur la figure 2.24. Le contrôle est réalisé sur une pièce en acier ferritique de

30 mm d'épaisseur présentant une entaille verticale de 12 mm de hauteur et 0,27 mm d'épaisseur, débouchant en fond de pièce. Le capteur, positionné à 20 mm de la surface de la pièce, comprend 64 éléments (pas interéléments de 0,8 mm, fréquence centrale de 2 MHz). Pour caractériser l'entaille, le capteur doit être excentré pour détecter à la fois le haut et le bas du défaut. Dans le cas où le capteur est centré sur le défaut (contrôle en $L0^\circ$), seul le haut du défaut est détecté, ce qui ne permet pas son dimensionnement. Pour la configuration décrite sur la figure 2.24, le capteur est positionné de façon à détecter et caractériser l'entaille à 45° (cet angle correspond à l'angle de transmission du rayon partant du centre du capteur jusqu'au pied de l'entaille). Il s'agit de l'angle de contrôle le plus communément utilisé pour ce type de défaut ; les angles plus forts sont privilégiés pour détecter des défauts à proximité de la surface et les angles plus faibles pour des pièces de fortes épaisseurs.

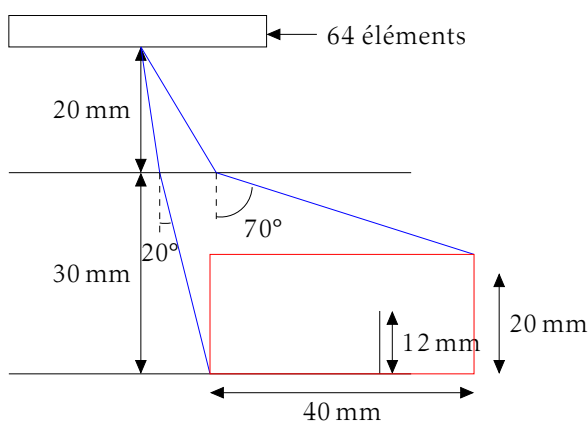


FIGURE 2.24 – Contrôle en immersion d'une entaille verticale : un capteur de 64 éléments est placé en immersion à 20 mm au-dessus de la surface de la pièce. Une entaille débouchant en fond de pièce de 12 mm de hauteur, est présente dans une pièce en acier de 30 mm d'épaisseur.

Le choix du mode demi-bond dépend de l'orientation et de la profondeur de l'entaille. Dans le cas présent (entaille verticale débouchant en fond de pièce), le mode le plus adapté est celui qui utilise des ondes transversales (T) sur tout le parcours ($TrTdT$). Une image obtenue en mode direct LdL est utilisée pour illustrer l'intérêt du mode demi-bond. La plage angulaire est comprise entre 20 et 70° avec un pas angulaire de 1° .

Comme en imagerie classique de type B-Scan ou S-Scan, les images du défaut en mode direct (cf. figures 2.25a et 2.25b) sont caractérisés par deux échos : le premier, au niveau du fond (appelé « écho de coin »), est dû à une interaction spéculaire au pied de l'entaille alors que le second, plus haut, provient de la diffraction de l'onde par le sommet de l'entaille. Les images en demi-bond $TrTdT$ (cf. figures 2.25c et 2.25d) sont similaires et améliorent la caractérisation du défaut car celui-ci est imagé sur toute sa hauteur. L'intérêt de cette reconstruction est que, dans de nombreux cas (notamment en présence de bruit de structure), l'écho de diffraction n'est pas perceptible, car son amplitude dépend de l'inclinaison et de l'ouverture de l'entaille,

et son dimensionnement devient difficile [22]. Sur ces images, on peut noter la présence d'artéfacts de reconstruction (non présents en mode direct *LdL* car il s'agit des temps de vol les plus courts) numérotés (1), (2) et (3). L'écho (1) est un « artéfact de géométrie » lié à l'interface du fond de pièce situé sous le capteur alors que (2) et (3) sont des « artéfacts de défaut » produits par le défaut lui-même. Ils sont dus à non-unicité des temps de vol, c'est-à-dire que pour certains points de la zone d'intérêt, un temps de vol va correspondre à plusieurs modes de propagation.

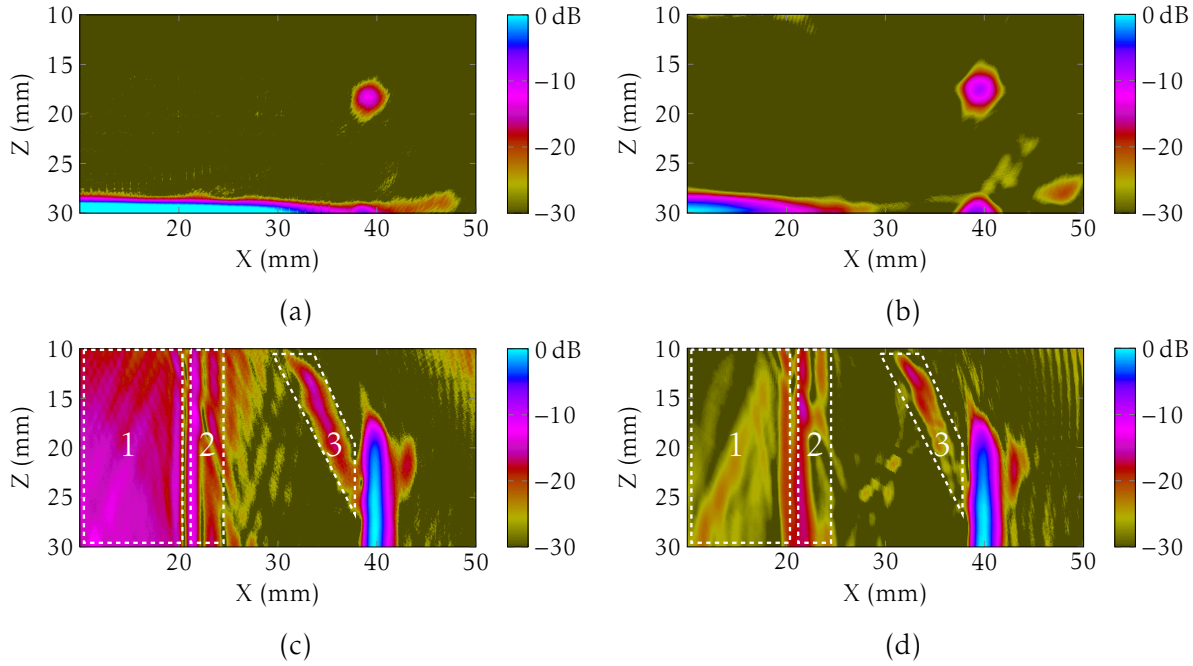


FIGURE 2.25 – Imagerie en mode demi-bond : images d'une entaille verticale de 12 mm avec la méthode (a) STA direct *LdL*, (b) PWI direct *LdL*, (c) STA demi-bond *TrTdT* et (d) PWI demi-bond *TrTdT*.

L'artéfact (1) existe car, pour les points de l'image situés sous le capteur, les temps de vol en demi-bond *TrTdT* sont identiques aux temps de vol en mode direct *TdT*. Autrement dit, l'artéfact (1) correspond à l'écho direct *TdT* provenant du fond qui est repositionné sur l'image à des temps de vol en demi-bond *TrTdT*. Le fait qu'il présente une amplitude plus forte dans l'image STA vient de la méthode d'acquisition. En effet, lors d'une acquisition STA, chaque élément émet dans presque toutes les directions, ce qui implique qu'après réfraction à l'interface, un nombre significatif d'ondes T sont transmises en direction du fond de la pièce. Beaucoup de trajets en mode direct *TdT* contribuent donc à l'écho parasite. En revanche, l'acquisition PWI commence à 20° , il y a donc beaucoup moins d'ondes T susceptibles de contribuer à l'écho de fond.

Les artéfacts (2) et (3) proviennent du défaut lui-même et sont associés à des modes de propagation en demi-bond avec conversion de modes. En effet, lors de la réfraction à l'interface, des ondes L sont transmises dans la pièce et les interactions avec le fond et/ou le défaut donnent lieu, dans certains cas, à des conversions de modes entre les

ondes longitudinales et transversales. Ici, les artefacts correspondent à un écho en mode $LrTdT$ repositionné au temps de vol $TrTdT$.

Pour confirmer cette analyse, les signaux de l'acquisition PWI ont été simulés avec le logiciel CIVA (les images sont calculées avec Matlab à partir des signaux simulés). La figure 2.26 présente les images calculées avec différentes options de simulation : simulation sans conversion de modes et sans écho de fond (cf. figure 2.26a) ; simulation sans conversion de modes et avec écho de fond (cf. figure 2.26b) ; simulation avec conversion de modes et sans écho de fond (cf. figure 2.26c) ; simulation complète avec tous les échos (cf. figure 2.26d).

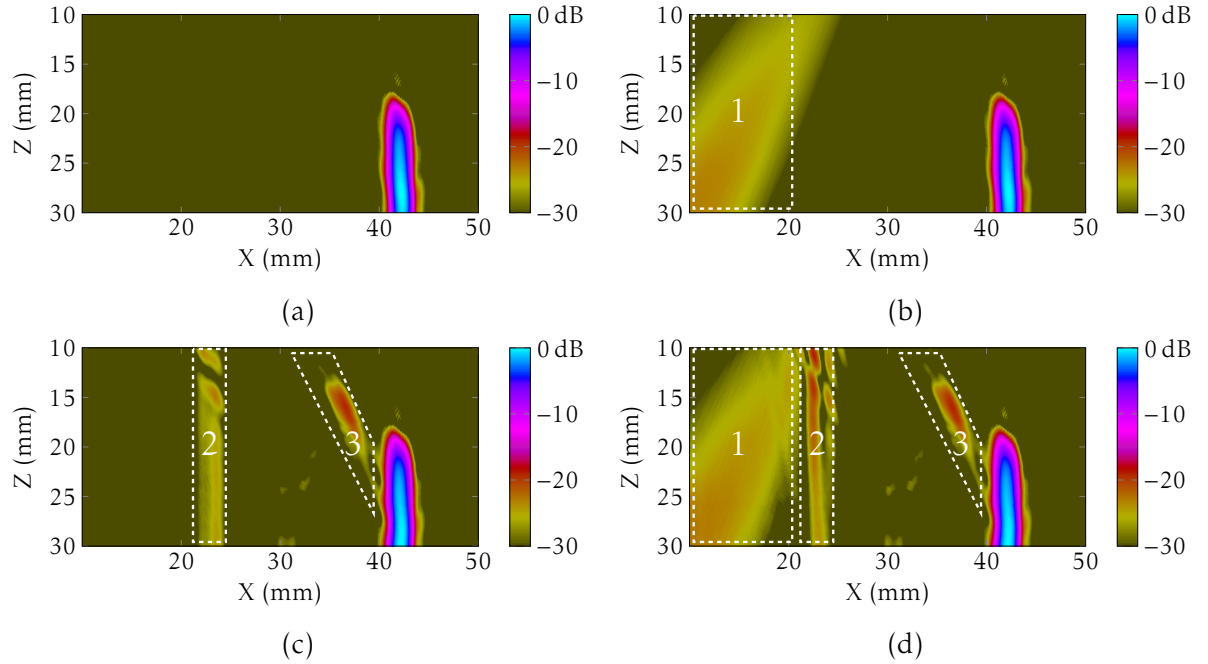


FIGURE 2.26 – Artefacts d'imagerie : images PWI d'une entaille verticale de 12 mm en mode $TrTdT$ calculées à partir de signaux simulés. (a) Sans prise en compte du fond et des conversions de modes, (b) avec prise en compte du fond, (c) avec prise en compte des conversions de modes et (d) avec prise en compte du fond et des conversions de modes.

En comparant les figures 2.26a et 2.26c, il est clair que l'artéfact (1) ne peut provenir que de l'écho de fond. Ces simulations confirment bien que cet artéfact provient du repositionnement de l'écho de fond en mode TdT , au temps de vol associé au mode de propagation $TrTdT$. Elles montrent également (cf. figures 2.26a et 2.26b) que, sans conversion de modes, les artéfacts (2) et (3) ne sont pas présents, ce qui n'est plus le cas lorsqu'elles sont considérées dans les simulations (cf. figures 2.26c et 2.26d). Ceci corrobore l'hypothèse selon laquelle les artéfacts (2) et (3) sont dus à la transmission d'ondes L dans le matériau. Le fait que l'amplitude de l'artéfact (3) soit plus faible en PWI peut être expliqué par le fait que l'angle critique pour les ondes L est de 14° (cf. chapitre 1, sous-section 1.6), ce qui correspond à un angle de transmission des ondes

T dans l'acier de 33° . Par conséquent, la transmission d'ondes T engendre des ondes L dans la pièce uniquement dans une étroite plage angulaire comprise entre 20 et 33° . Au contraire, le principe de l'acquisition STA fait que chaque onde émise se propage dans toutes les directions, ce qui mène à la transmission d'ondes L à beaucoup plus d'angles, d'où la plus forte amplitude de l'artéfact.

Le mode de propagation $TrTdT$ est utile pour dimensionner une entaille. Si l'on regarde la figure 2.27b, on observe que la mesure à -6 dB de la longueur de l'entaille est à peu près la même avec les deux méthodes. La courbe échodynamique suivant la direction X confirme également qu'il y a plus de bruit dans l'image STA.

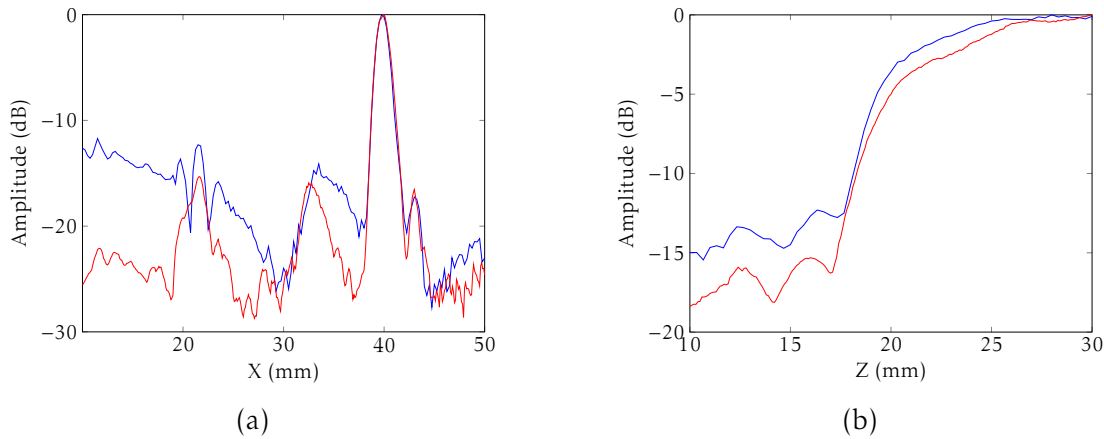


FIGURE 2.27 – Imagerie en mode demi-bond : courbes échodynamiques selon la direction (a) X et (b) Z. (—) : PWI (20 à 70° , pas de 1°), (—) : STA.

Un intérêt de la méthode PWI réside dans la possibilité de choisir la plage angulaire de manière à éliminer les artéfacts. Sachant que l'angle critique pour les ondes L correspond à une transmission d'ondes T à 33° , les artéfacts dus aux conversions de modes peuvent être supprimés en transmettant les ondes T à des angles supérieurs. Dans un premier temps, la plage angulaire a donc été changée pour transmettre au-dessus de l'angle critique des ondes L. Les ondes transmises entre 34 et 70° ont été utilisées. Puis, dans le but d'explorer la faisabilité de contrôles ultra-rapides, l'image est aussi calculée avec une seule émission plane à 45° . Les images obtenues sont présentées sur la figure 2.28. Comme attendu, les artéfacts dus aux conversions de modes ont disparus. L'image obtenue avec 37 ondes ne présente quasiment plus de bruit supérieur à -30 dB et l'écho du défaut est toujours identifiable. En réduisant l'émission à une unique onde plane à 45° , on constate que l'entaille est toujours parfaitement imagée, malgré une légère hausse du niveau de bruit dans le reste de l'image. La possibilité de produire une image d'un défaut avec un seul tir ultrasonore est particulièrement intéressante pour augmenter la cadence d'imagerie et réduire le volume de données à stocker lors d'un contrôle d'une structure de grandes dimensions (contrôle de tubes, rails...). C'est cette application qui est explorée dans la section suivante.

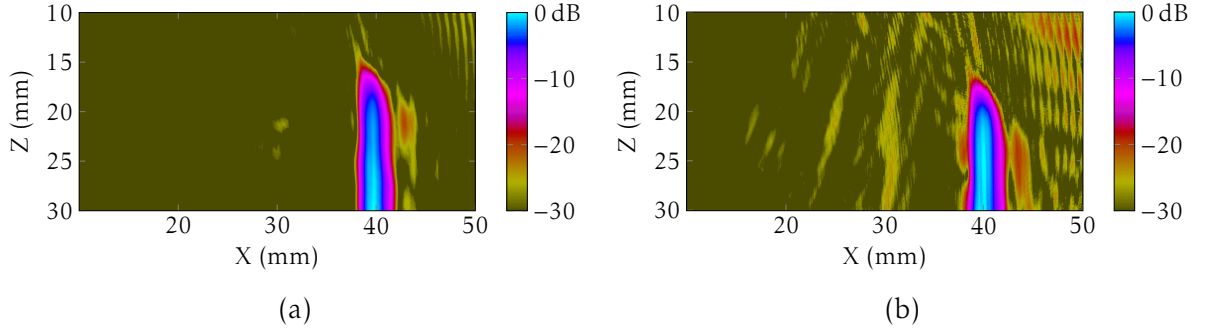


FIGURE 2.28 – Imagerie en mode demi-bond : images obtenues avec la méthode PWI en réduisant le nombre d’ondes planes transmises. (a) 37 ondes planes (34 à 70°, pas de 1°) et (b) 1 onde plane (45°).

3.4 Imagerie PWI avec balayage mécanique

Les sections précédentes montrent que, pour une position fixe de la sonde, la méthode PWI réduit le nombre de transmissions, tout en préservant une excellente qualité d’image. Ici, on se propose d’évaluer la méthode lorsque la sonde est déplacée sur un axe mécanique de translation pour imager l’intégralité d’une pièce.

Dans un premier temps, la méthode PWI (mode direct LdL) est comparée à un B-Scan conventionnel (balayage/profondeur) où l’émission est focalisée en un seul point pour chaque position de la sonde (cf. chapitre 1, sous-section 4.2.1). En particulier, l’influence du pas d’acquisition sur la qualité des images est étudiée. Dans un second temps, le concept d’imagerie multimodes par émission d’ondes planes est présenté. On démontre qu’il est possible d’améliorer la caractérisation de défauts en émettant à la fois des ondes planes L et T au cours d’une même acquisition, et en fusionnant plusieurs modes (LdL et $TrTdT$) au sein d’une même image.

En balayage mécanique, l’image finale est obtenue en sommant les images PWI calculées à toutes les positions de la sonde. Si le pas de balayage Δx est inférieur à la largeur de l’image PWI ($\Delta x < L_x$), les images se chevauchent et chaque point est compris dans plusieurs zones. Un point P de l’image finale est la somme de $N_x = \text{Ent}[L_x/\Delta x]$ amplitudes PWI calculées avec Q ondes planes (où Ent dénote la partie entière). Le principe de reconstruction en balayage mécanique peut donc s’écrire :

$$A(P) = \sum_{n_x=1}^{N_x} \left| \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^N s_{qj}^{n_x} \left(t_{qn_x}^e(P) + t_{jn_x}^r(P) \right) \right|, \quad (2.28)$$

où $s_{qj}^{n_x} \left(t_{qn_x}^e(P) + t_{jn_x}^r(P) \right)$ est le signal reçu par le récepteur j , pour l’angle q et la zone d’intérêt n_x et N_x est le nombre de zones contenant le point P.

3.4.1 Imagerie en mode direct

Dans cette expérience, une maquette en acier de 58 mm d'épaisseur comprenant une série de trous latéraux (2 mm de diamètre) est inspectée à l'aide d'un capteur de 64 éléments (pas interéléments de 0,8 mm) et de fréquence centrale 2 MHz (cf. figure 2.29).

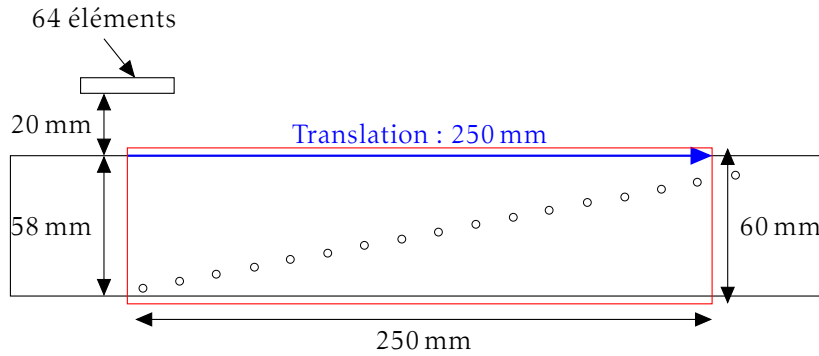


FIGURE 2.29 – Imagerie en mode direct avec balayage mécanique : un capteur de 64 éléments est placé en immersion à 20 mm de la surface de la pièce. Des défauts artificiels (trous de 2 mm de diamètre) sont implantés dans la pièce en acier de 58 mm d'épaisseur. La sonde est translatée de 250 mm.

Deux acquisitions en balayage mécanique ont été réalisées avec un appareil MultiX en translatant le capteur sur une distance de 250 mm. La première acquisition est la technique conventionnelle qui offre le meilleur compromis entre cadence d'imagerie et résolution. Il s'agit d'une émission focalisée en un point (à 30 mm de profondeur dans l'axe du capteur) optimisée par une focalisation dynamique en réception (4 points focaux régulièrement espacés entre 10 et 50 mm, cf. chapitre 1, sous-section 4.2.3). Cette méthode fonctionne en temps-réel dans le système MultiX et une image B-Scan (balayage/profondeur) de la pièce est directement affichée par l'appareil. La seconde acquisition correspond à l'émission d'une onde plane longitudinale à 0° en chaque position de la sonde (l'image PWI finale étant calculée en post-traitant les données acquises avec Matlab). En une position, l'image PWI a pour dimensions 50 mm × 60 mm (largeur × hauteur) et l'image complète de la pièce est ensuite calculée en suivant le principe d'accumulation des images PWI décrit ci-dessus. La qualité d'image peut évidemment être optimisée en émettant plusieurs fois à chaque position, comme ce qui était fait jusqu'à présent, mais l'objectif est ici de comparer PWI à une méthode ultra-rapide ne mettant en jeu d'un seul tir par position.

Le pas d'acquisition Δx a été choisi de manière à conserver une résolution latérale (R_{lat}) optimale pour la méthode de l'émission focalisée. Comme défini dans le chapitre 1, la résolution latérale correspond à la largeur à mi-hauteur du faisceau focalisé et une résolution optimale d'une image en balayage mécanique impose que $R_{lat} < \Delta x$. Pour une focalisation dans l'acier à 30 mm et un capteur à 2 MHz, $R_{lat} = 2$ mm (cf. figure 2.30a). La méthode PWI peut être mise en œuvre avec des pas de balayage

beaucoup plus grands car l'onde plane émise est beaucoup plus large qu'un faisceau focalisé (cf. figure 2.30b). Il est à noter que les deux bandes présentant le maximum d'amplitude, situées sur les côtés du faisceau, sont dues à la diffraction par les bords du capteur et peuvent être corrigés en apodisant l'émission.

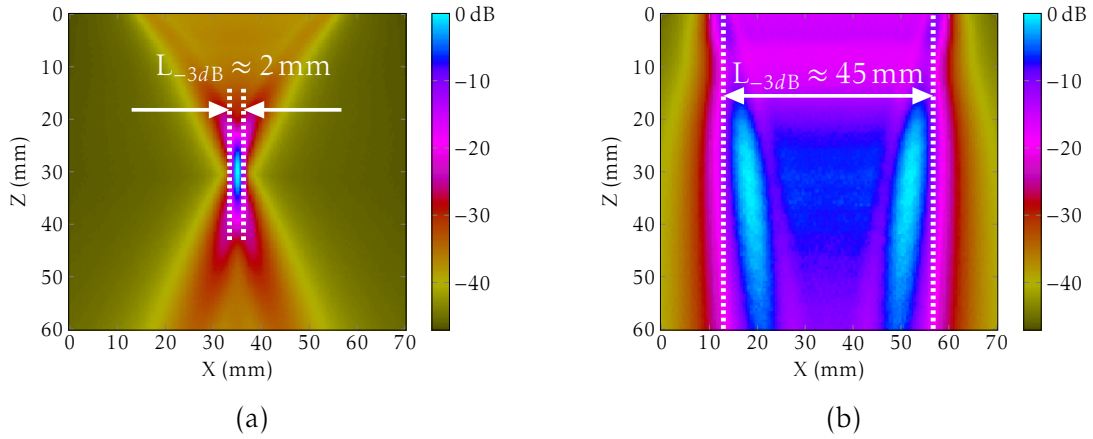


FIGURE 2.30 – Faisceaux ultrasonores simulés dans le cas (a) d'une focalisation à 30 mm de profondeur, (b) de la transmission d'une onde plane à 0°.

Pour un pas de balayage de 1 mm, les deux méthodes fournissent des résultats équivalents, avec un seul tir ultrasonore en chaque position (cf. figure 2.31). On note que, dans l'image conventionnelle, l'amplitude des échos décroît lorsque l'on s'éloigne du point de focalisation à l'émission, en dépit de la focalisation dynamique en réception. Ceci s'explique par le fait que l'épaisseur de la pièce est beaucoup plus grande que la profondeur de champ Z_{champ} (épaisseur = $2Z_{champ}$, cf. chapitre 1 sous-section 3.2). On constate que ce n'est pas le cas dans l'image PWI. L'amplitude reste constante quelle que soit la profondeur du défaut car dans ce cas, Z_{champ} est grand par rapport à l'épaisseur de la pièce.

Deux nouvelles acquisitions sont effectuées avec un pas de balayage $\Delta x = 4 \text{ mm}$ et on observe que l'image conventionnelle est dégradée alors que l'image PWI est inchangée (cf. figure 2.31). Dans cette dernière, les défauts sont très mal résolus et certains sont même manquants pour certaines positions. Par exemple, le trou situé à environ $X = 200 \text{ mm}$ n'est pas détecté car le pas de balayage Δx fait qu'il se situe entre deux positions d'acquisitions. Au contraire, en PWI, un point de l'image est insonifié par $N_x = 6$ ondes planes (cf. équation 2.28), ce qui permet de garder une très bonne qualité d'image. De plus, des tests ont révélé qu'il était possible d'utiliser un pas de balayage mécanique jusqu'à 12 mm sans perte significative de qualité d'image.

Ces images montrent clairement que l'utilisation de la méthode PWI dans le cas d'un balayage mécanique permet d'augmenter significativement le pas d'acquisition et, par conséquent, de réduire le temps de contrôle pour des pièces de grandes dimensions.

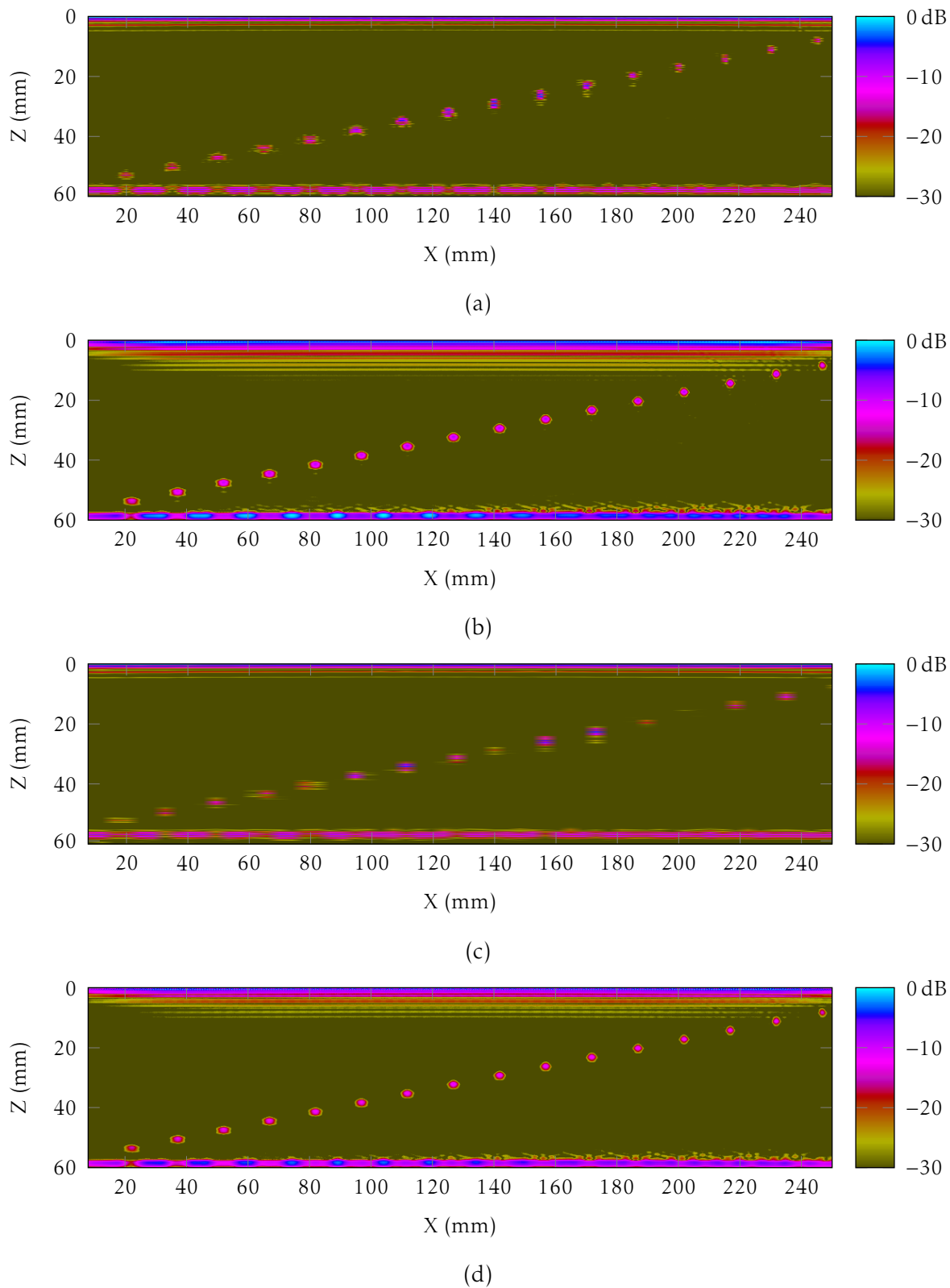


FIGURE 2.31 – Imagerie PWI en mode direct, associée à un balayage mécanique : les acquisitions sont réalisées avec un pas de (a,b) 1 mm et (c,d) 4 mm en appliquant pour chaque position (a-c) une focalisation en un point à 30 mm de profondeur dans l'axe du capteur et (b-d) la méthode PWI avec l'émission d'une seule onde plane à 0° .

3.4.2 Imagerie multimodes

La section précédente a montré que la méthode PWI permet de contrôler des pièces de grandes dimensions en utilisant de grand pas d'acquisition par rapport à une émission focalisée. On s'intéresse maintenant à la possibilité de combiner un déplacement mécanique avec différents modes de propagation (direct et demi-bond). L'objectif est de démontrer le concept d'imagerie multimodes avec qui peut être potentiellement utilisé pour détecter des défauts de différentes natures (défauts volumiques, de type fissure, corrosion) lors d'une même acquisition. Pour cela, une expérience a été réalisée sur une pièce en acier de 49 mm d'épaisseur (cf. figure 2.32), qui comprend des encoches de 10 mm de hauteur et de différentes largeurs (de 20 à 1 mm).

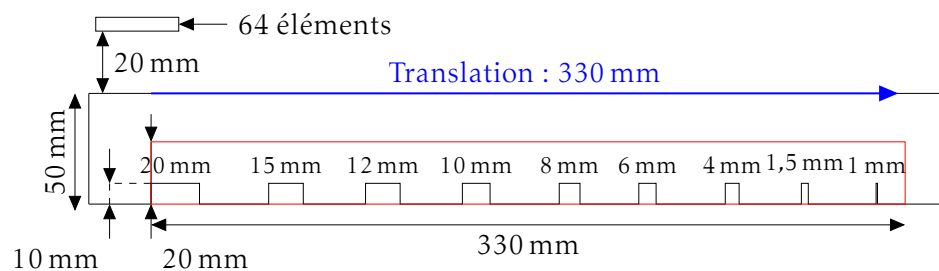


FIGURE 2.32 – Imagerie multimodes : un capteur de 64 éléments est placé en immersion à 20 mm de la surface d'une pièce en acier ferritique. Une série d'encoches (de 10 mm hauteurs et de différentes largeurs) est usinée dans la pièce de 50 mm d'épaisseur. Le capteur est translaté de 330 mm.

Le balayage mécanique est effectué sur 330 mm avec un pas d'acquisition de 8 mm. L'imagerie multimodes en PWI est appliquée ici pour imager le contour des encoches. En chaque position du capteur, on réalise trois images : la première est placée sous le capteur pour imager le fond de pièce ainsi que le haut des encoches à l'aide du mode direct ; les deux autres sont localisées de part et d'autre du capteur, hors de son axe, pour imager les faces verticales des encoches grâce au mode demi-bond (cf. figure 2.33). En PWI, trois séries d'ondes sont transmises : les ondes longitudinales dans une plage angulaire couvrant la zone d'intérêt (-20 à 20°) avec un pas angulaire de 10° (c'est-à-dire 5 ondes L) ; les ondes transversales entre $\pm 37^\circ$ et $\pm 39^\circ$ avec un pas de 1° (soit 6 ondes T). L'image finale est obtenue comme dans la section précédente, en sommant les contributions des différentes positions du capteur. Comme il existe une différence d'amplitude entre les images en mode direct et celles en demi-bond, les images sont normalisées avant d'être sommées. En STA, 64 tirs sont effectués pour chaque position de la sonde et l'image complète du balayage est obtenue de la même façon qu'en PWI (sommation des trois images calculées pour chaque position de capteur).

Les images produites à l'aide de ce procédé sont présentées sur les figures 2.34 et 2.35 et plusieurs choses sont à relever. Tout d'abord, on constate que les images en mode direct (cf. figures 2.34a et 2.35a) sont très proches l'une de l'autre alors que l'image PWI est obtenue à partir de seulement 5 tirs par position contre 64 tirs pour

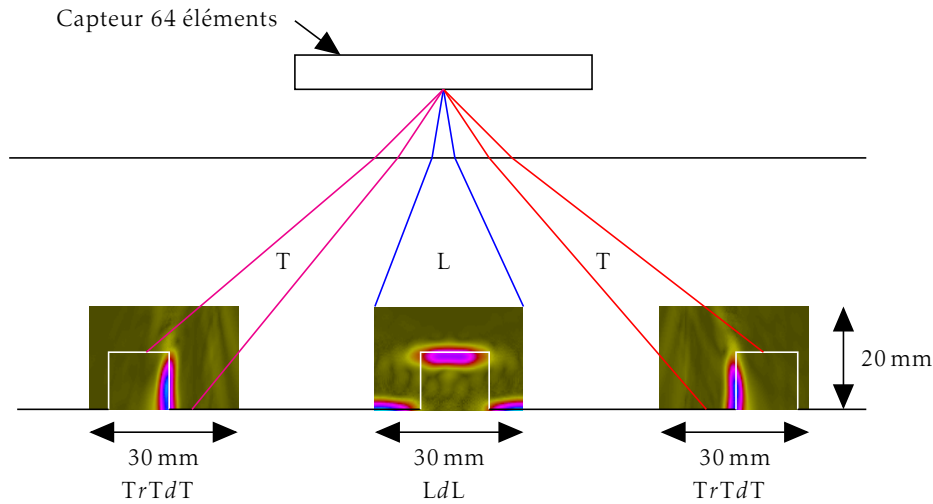


FIGURE 2.33 – Imagerie PWI multimodes : pour chaque position du capteur, trois images sont réalisées : une en mode direct LdL et les deux autres en mode demi-bond $TrTdT$. En chaque position, 5 ondes L (entre -20° et 20°) et 6 ondes T (entre $\pm 37^\circ$ et $\pm 39^\circ$) sont transmises.

la méthode STA. Mais la différence la plus manifeste entre les deux méthodes réside dans l'image $TrTdT$: le RSB de l'image STA est faible (≈ 15 dB) alors que celui en PWI reste bon (> 30 dB). Ceci vient de l'artéfact de géométrie, présenté en 3.3.2, qui se retrouve sur chaque image STA. Comme l'image finale résulte de la sommation des contributions des différentes positions, cet artéfact augmente le niveau de bruit dans toute la zone. Les images PWI ne contiennent pas cet écho et l'image finale est peu bruitée. Le résultat de la combinaison des deux modes est affiché sur les figures 2.34c et 2.35c. L'image STA présente un faible RSB, à l'inverse de l'image PWI qui présente toujours un RSB supérieur à 30 dB. Sur cette figure 2.35c, il est remarquable que le fond de pièce ainsi que les différentes encoches sont complètement détectés, aussi bien les faces verticales que celles horizontales, avec seulement 11 transmissions par position. Au total, l'image PWI est obtenue après 451 tirs ($11 \text{ ondes} \times 41 \text{ positions}$) contre 2624 (64×41) pour la méthode STA. Un tel résultat semble prometteur pour l'inspection de composants de grandes dimensions et la possibilité de mettre à contribution plusieurs modes pour détecter différents types de défauts.

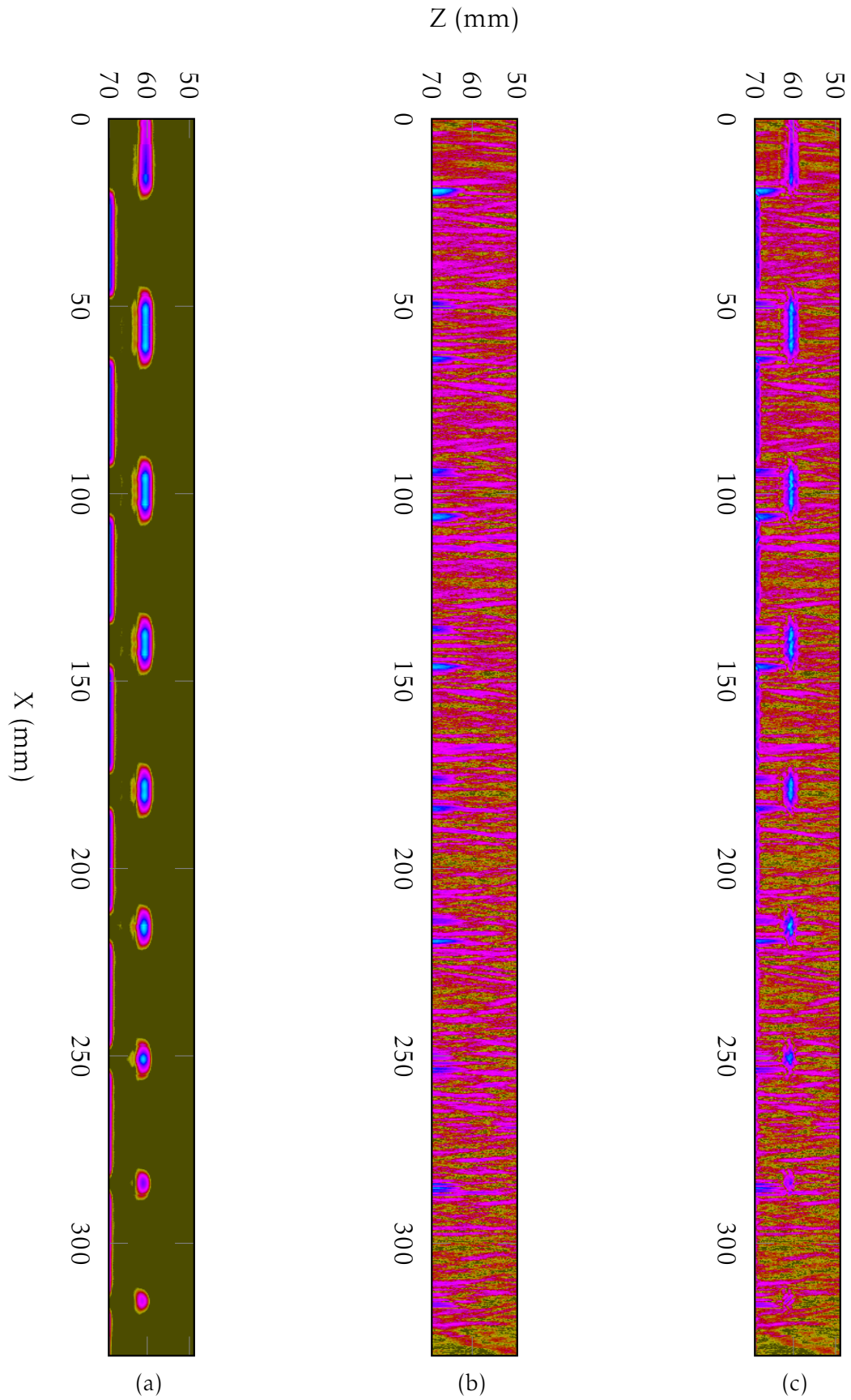


FIGURE 2.34 – Imagerie STA multimodes : (a) mode LdL , (b) $TrTdT$ et (c) multimodes. L'échelle de couleur va de 0 dB à -30 dB.

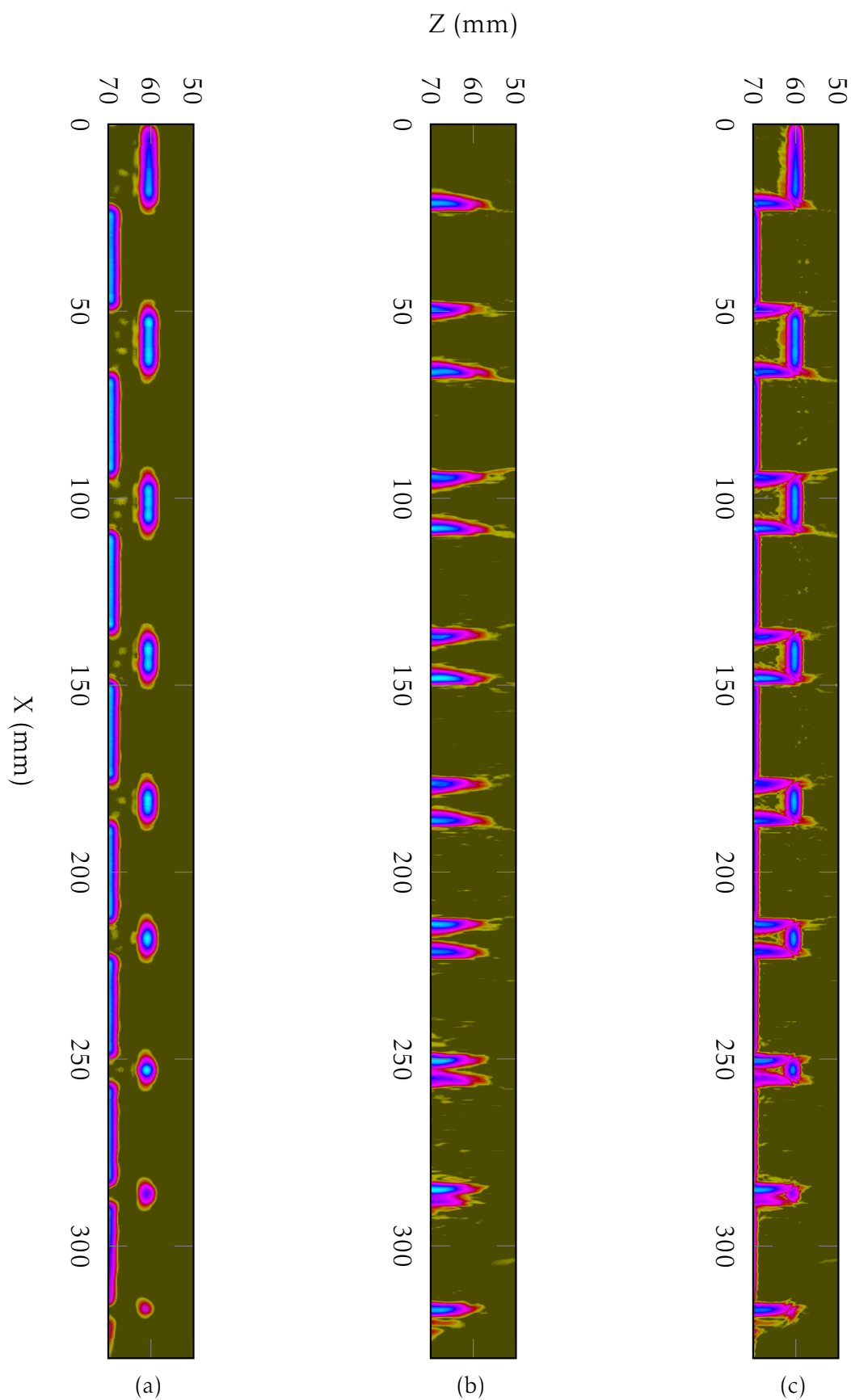


FIGURE 2.35 – Imagerie PWI multimodes : (a) mode LdL , (b) $TrTdT$ et (c) multimodes. L'échelle de couleur va de 0 dB à -30 dB.

4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, une nouvelle méthode, basée sur l'émission d'ondes planes a été présentée et comparée à l'imagerie STA. Tout d'abord, les algorithmes associés à ces deux méthodes ont été introduits pour deux modes de propagation : les modes direct et demi-bond. Il a été montré que la méthode PWI permettait de simplifier les calculs, notamment en mode demi-bond. L'algorithme PWI a ensuite été validé expérimentalement, au contact d'une pièce, puis en immersion en mode direct. Ces expériences ont montré que, dans le cas de matériaux homogènes et peu atténuants, la méthode PWI procure des images de qualité équivalente à celle des images STA, tout en nécessitant moins de transmissions. Un test mené sur un échantillon de polyéthylène haute densité a prouvé que, dans un environnement atténuant, la méthode PWI permet de détecter des défauts qui ne sont pas visibles sur les images STA. Les deux méthodes d'imagerie ont également été utilisées pour caractériser une entaille en mode demi-bond. Les résultats obtenus mettent en évidence que la méthode PWI permet de réduire, voire d'éliminer, les artéfacts d'imagerie dus à la géométrie de la pièce ou à des conversions de modes. Des images PWI ont été réalisées avec un seul tir ultrasonore, sans dégradation notable du RSB. Finalement, la méthode PWI a été évaluée dans le cas d'une acquisition avec un déplacement du capteur. Dans un premier temps, elle a été comparée à une méthode d'imagerie conventionnelle qui procure le meilleur compromis entre qualité d'image et vitesse d'inspection. Cette expérience a montré qu'avec une seule transmission à 0° , la méthode PWI fournit une image de qualité équivalente à celle de la méthode conventionnelle, tout en offrant la possibilité d'augmenter de manière importante le pas d'acquisition, ce qui réduit les temps de contrôle et le volume de données à stocker et à traiter. Dans un second temps, le principe de l'imagerie PWI multimodes a été démontré, en combinant les modes de propagation direct et demi-bond, pour imager des encoches. On a prouvé qu'il était possible d'imager le fond de pièce, le haut des encoches ainsi que leurs faces verticales avec quelques tirs ultrasonores en chaque position du capteur.

Ce chapitre a mis en évidence que la méthode PWI fournit des images de qualité égale à celles des images STA, tout en nécessitant moins de tirs. Dans certaines configurations de contrôle, elle donne même des images de qualité supérieure grâce, en particulier, à l'élimination des artéfacts d'imagerie. Dans le chapitre 3, les deux méthodes vont être généralisées pour inspecter des pièces de surfaces complexes, et en particulier pour imager des défauts lorsque la géométrie de surface n'est pas connue en cours de contrôle. On parle alors d'imagerie adaptative.

Chapitre 3

Imagerie adaptative

L'objectif de ce chapitre est double : il s'agit de généraliser les méthodes STA et PWI pour traiter les cas de surfaces complexes, puis de coupler ces méthodes à des algorithmes de mesure de surface pour réaliser de l'imagerie adaptative. Dans un premier temps, quatre méthodes de mesure de surface sont présentées et évaluées en termes de précision et de robustesse. Ensuite, une méthode adaptative, basée sur l'acquisition STA est proposée [42]. On s'intéresse notamment à la généralisation du calcul des trajets ultrasonores par la méthode de descente de gradient à travers une surface complexe. Enfin, une méthode utilisant l'acquisition PWI est introduite. En particulier, on détaille l'algorithme le calcul des lois de retards pour transmettre des ondes planes sous des surfaces complexes [43, 44]. Des résultats expérimentaux sont présentés pour ces deux méthodes. Ils montrent que les deux méthodes donnent de très bons résultats, avec des images de qualité équivalente à celles obtenues en connaissant la position du capteur ainsi que la géométrie de la surface.

1 Intérêt de l'imagerie adaptative

Il a été évoqué dans le chapitre 1 (section 2), le cas du contrôle de pièces présentant des géométries irrégulières. Au contact de la pièce, le couplage acoustique entre la sonde et la pièce n'est plus assuré et les lois de focalisation ne sont plus adaptées à la géométrie, ce qui dégrade l'image finale (cf. figure 3.1a). Les capteurs conformables pallient ce problème en épousant la surface à l'aide d'éléments indépendants assemblés dans une matrice flexible (cf. figure 3.1b), mais leur coût de fabrication et les temps de contrôle sont élevés. Les contrôles en immersion permettent d'utiliser des capteurs à plus faibles coûts et autorisent des vitesses d'inspection plus élevées, mais impliquent une très bonne connaissance de la géométrie de la surface et de la position du capteur, ce qui n'est généralement pas le cas (cf. figures 3.1c et 3.1d). C'est l'intérêt de l'utilisation de méthodes adaptatives, mises en œuvre en immersion, que ce soit en cuve, à l'aide de jet d'eau ou avec des sabots souples (comme on le verra plus loin dans le chapitre). Ces méthodes permettent de détecter des défauts sous une surface *a priori* inconnue ou lorsqu'il y a une imprécision sur le positionnement du capteur multiéléments au-dessus de la surface [45–47]. De plus, dans le cas d'une structure possédant différentes géométries de surface, l'utilisation d'une méthode adaptative avec un seul capteur conventionnel peut remplacer plusieurs capteurs avec différentes mises en forme.

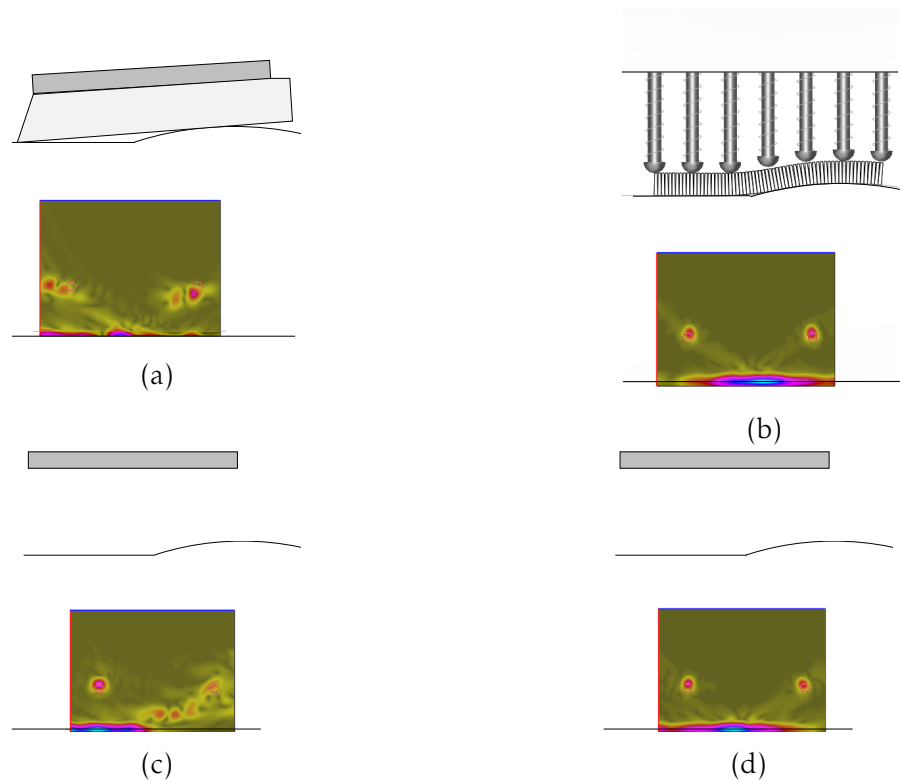


FIGURE 3.1 – Imagerie STA sous une surface complexe : (a) contrôle au contact avec un sabot non adapté, (b) capteur conforme, (c) contrôle en immersion (surface inconnue), l'image est calculée en supposant la surface plane et (d) contrôle en immersion (surface connue).

2 Comparaison des méthodes de mesure de surface

Quelle que soit la méthode employée, l'imagerie adaptative comporte toujours une première phase de mesure de la surface. Cette section vise donc à évaluer différentes méthodes de mesure de surface afin de retenir la plus performante (robustesse et précision). Dans un premier temps, l'acquisition et les algorithmes propres à chaque méthode sont présentés. Les méthodes sont ensuite évaluées expérimentalement à l'aide de trois maquettes en acier présentant différentes géométries.

2.1 Description des méthodes

Les méthodes présentées ici peuvent être classées dans deux catégories : celles basées sur une mesure des temps de vol entre la surface de la pièce et les éléments du capteur comme les méthodes Pulse-Echo, Pitch-Catch et SAUL, et celles basées sur la réalisation d'une image, puis son traitement comme la méthode STA. Ces méthodes sont implémentées depuis déjà quelques années dans le logiciel CIVA [48].

2.1.1 Méthode Pulse-Echo

La première méthode d'estimation de surface, dérivée d'une méthode développée dans le domaine de l'électromagnétisme [49], repose sur la mesure des temps de vol t_m des échos de surface obtenus lors d'un balayage électronique simple (chaque élément émet et reçoit successivement, cf. chapitre 1, 4.2.2). En pratique, ces temps sont mesurés en définissant un seuil au-dessus du bruit dans l'eau et en détectant le premier maximum de l'enveloppe de chaque signal enregistré.

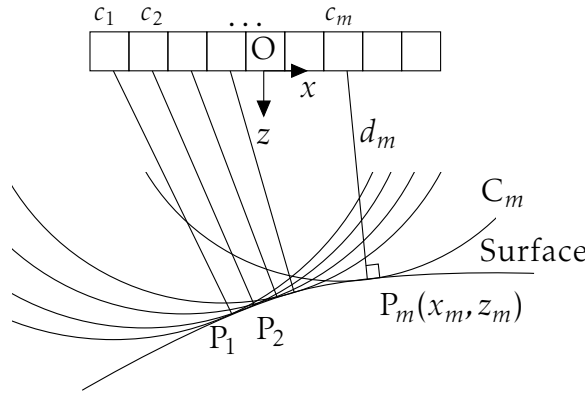


FIGURE 3.2 – Mesure de surface par la méthode Pulse-Echo : chaque élément est utilisé en mode émission/réception. Pour un élément, le temps de vol spéculaire t_m est mesuré en détectant le premier maximum de l'enveloppe du signal reçu. Le point P_m correspondant à la mesure de t_m appartient au cercle C_m de centre c_m et de rayon d_m .

Un temps de vol mesuré, correspondant au temps de parcours le plus court entre le capteur et la surface, est appelé temps de vol spéculaire et il concorde avec le trajet d'un rayon normal à la surface (cf. figure 3.2). L'émetteur et le récepteur étant confondus, le point d'intersection $P_m(x_m, z_m)$ entre le rayon spéculaire et la surface appartient à un cercle C_m de centre c_m et de rayon $d_m = v_e t_m / 2$, où v_e est la vitesse dans l'eau. Pour un capteur de N éléments, en mesurant le temps de vol spéculaire pour chaque élément et en supposant que tous les échos proviennent de réflexions spéculaires, la surface peut être vue comme la courbe tangentielle aux N cercles. Estimer la surface à partir des temps de vol mesurés consiste donc à calculer la courbe enveloppe de la famille de cercles $\Gamma_c = [C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_N]$ dans le plan xOz . Cette famille de cercle est indexée par la position c du centre du cercle le long du plan du capteur, et on suppose qu'elle dépend de ce paramètre de façon différentiable. L'enveloppe est la courbe qui vérifie le système suivant :

$$\begin{cases} F(x, z, c) = 0 \\ \frac{\partial F(x, z, c)}{\partial c} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$(3.2)$$

où $F(x, z, c) = 0$ est l'équation d'un cercle de centre c et de rayon d :

$$F(x, z, c) = (x - c)^2 + z^2 - d^2. \quad (3.3)$$

L'équation 3.2 permet d'exprimer x en fonction des paramètres du problème :

$$x = c - d' d, \quad (3.4)$$

avec d' la dérivée de d par rapport à c . En remplaçant l'expression de x (équation 3.4) dans l'équation 3.1, on obtient l'ordonnée z :

$$z = d \sqrt{1 - (d')^2}. \quad (3.5)$$

On approxime maintenant la dérivée d' de d par rapport à c comme suit :

$$d'_m = \frac{d_{m+1} - d_m}{c_{m+1} - c_m}, \quad (3.6)$$

avec $m = 1, 2, \dots, N-1$. On obtient alors les coordonnées x_m et z_m du point P_m associées au cercle C_m :

$$\begin{cases} x_m = c_m - d'_m d_m \\ z_m = d_m \sqrt{1 - (d'_m)^2} \end{cases} . \quad (3.7)$$

Pour un capteur de N éléments, la méthode Pulse-Echo nécessite N tirs ultrasonores et permet d'estimer au maximum $N - 1$ points de la surface, ce qui peut se révéler insuffisant quand le capteur possède 64, voire 32 éléments. De plus, le fait de n'enregistrer qu'un seul signal à chaque émission fait que cette méthode est adaptée à des surfaces relativement peu accidentées.

2.1.2 Méthode Pitch-Catch

La méthode Pitch-Catch permet d'améliorer la robustesse de la mesure de surface car elle exploite beaucoup plus de signaux et dispose donc de plus d'information sur la surface [48, 50]. Elle repose sur l'acquisition de la matrice $\mathbf{K}(t)$ (cf. chapitre 1 sous-section 4.5). Pour un capteur de N éléments, chaque émetteur i fournit N points de mesure. Le temps de vol t_m mesuré sur l'enveloppe du signal $k_{ij}(t)$ définit un point P_m de la surface qui appartient donc à une ellipse E_m dont les foyers sont les centres de l'émetteur i et du récepteur j (cf. figure 3.3). La distance f_m représente la distance entre un des foyers et le centre c_m de l'ellipse. La longueur du demi-grand axe est reliée au temps de vol t_m par la relation $a_m = t_m v / 2$ et celle du demi-petit axe est donnée par $b_m = \sqrt{a_m^2 - f_m^2}$. Pour un émetteur i , en mesurant le temps de vol entre celui-ci et tous les récepteurs ($j = 1, 2, \dots, N$), la surface est décrite par la courbe tangentielle aux N ellipses et peut être vue comme l'enveloppe de la famille d'ellipses $\Gamma_E = [E_1, E_2, \dots, E_m, \dots, E_N]$.

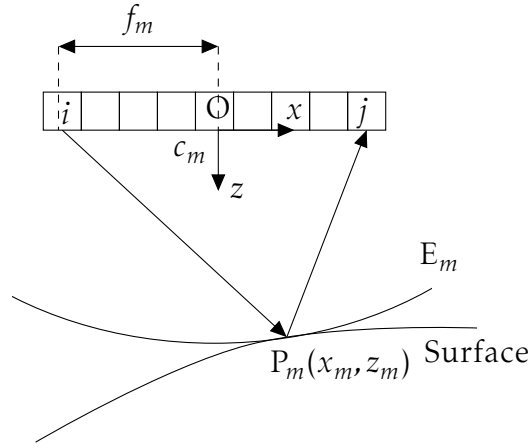


FIGURE 3.3 – Mesure de surface par la méthode Pitch-Catch : les éléments émettent successivement et tous les récepteurs sont utilisés à chaque émission. Pour un émetteur i et un récepteur j , le temps de vol t_m est mesuré sur l'enveloppe du signal interéléments $k_{ij}(t)$. Le point P_m appartient à l'ellipse E_m de centre c_m , dont les foyers correspondent aux centres de l'émetteur i et du récepteur j .

La fonction $F(x, z, c)$ des équations (3.1) et (3.2) se rapporte ici à une ellipse de centre c , de demi-grand axe a et de demi-petit axe b :

$$F(x, z, c) = (x - c)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 z^2 - a^2. \quad (3.8)$$

En résolvant $\partial F(x, z, c)/\partial c = 0$, on obtient une expression de l'ordonnée z en fonction des paramètres du problème :

$$z^2 = \frac{aa' + (x - c)}{\left(\frac{a}{b}\right)' \left(\frac{a}{b}\right)}. \quad (3.9)$$

En posant $X = x - c$ et en remplaçant l'expression de z^2 (équation 3.9) dans l'équation 3.8, cette dernière se réécrit :

$$\left(\frac{a}{b}\right)' X^2 + \left(\frac{a}{b}\right) X + \frac{a^2 a'}{b} - a^2 = 0. \quad (3.10)$$

On observe qu'il s'agit d'une équation du second degré dont la résolution permet de déterminer la coordonnée x :

$$x = c + a\Delta, \quad (3.11)$$

avec

$$\Delta = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ab'(ab' - a'b)}}{2(a'b - ab')}. \quad (3.12)$$

En remplaçant l'expression de x dans l'équation 3.9, on obtient l'expression finale de l'ordonnée z :

$$z = b\sqrt{1 - \Delta^2}. \quad (3.13)$$

Comme pour la méthode Pulse-Écho, on approxime les dérivées des demi-grand axe et demi-petit axe par rapport à c par :

$$\begin{cases} a'_m = \frac{a_{m+1} - a_m}{c_{m+1} - c_m} \\ b'_m = \frac{a_m a'_m - d_m}{b_m} \end{cases}. \quad (3.14)$$

Les coordonnées x_m et z_m du point P_m associées à l'ellipse E_m s'écrivent alors :

$$\begin{cases} x_m = c_m + a_m \Delta_m, \\ z_m = b_m \sqrt{1 - \Delta_m^2} \end{cases}, \quad (3.15)$$

avec :

$$\Delta_m = \frac{-b_m + \sqrt{b_m^2 - 4a_m b'_m (a_m b'_m - a'_m b_m)}}{2(a'_m b_m - a_m b'_m)}. \quad (3.16)$$

Cette méthode permet d'avoir un grand nombre de points de mesure (au maximum $(N - 1)^2$), ce qui améliore la reconstruction de la surface lorsque la géométrie devient très complexe ou lorsque le capteur ne possède pas suffisamment d'éléments. Cependant, en pratique, on n'exploite pas la totalité des N ellipses par émetteur car certains signaux $k_{ij}(t)$ sont proches du niveau de bruit électronique. C'est le cas, par exemple, lorsque les émetteurs et récepteurs sont éloignés l'un de l'autre. On définit alors un seuil en amplitude en dessous duquel le signal n'est pas conservé.

Pour éliminer les points mal positionnés à cause d'une erreur ou d'une imprécision de mesure sur les temps de vol, le profil obtenu peut être lissé en considérant le rayon de courbure local R_m . Pour une courbe définie, en coordonnées cartésiennes, par la fonction $y(x)$, le rayon de courbure est donné par :

$$R_m = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''}. \quad (3.17)$$

Comme nous n'avons pas d'expression explicite de la fonction $y(x)$, les dérivées premières (y') et secondes (y'') sont approximées. Un point P_m sera supprimé si R_m ne satisfait pas $R_{min} \leq R_m$, où R_m est exprimé par :

$$R_m = \left[1 + \left(\frac{\Delta z_m + \Delta z_{m-1}}{\Delta x_m + \Delta x_{m-1}} \right)^2 \right]^{3/2} \left(\frac{\Delta z_m}{\Delta x_m^2} - \frac{\Delta z_{m-1}}{\Delta x_m \Delta x_{m-1}} \right)^{-1}, \quad (3.18)$$

avec $\Delta x_m = x_{m+1} - x_m$ et $\Delta z_m = z_{m+1} - z_m$. La valeur de R_{min} peut être estimée lors d'une phase de calibration avec un capteur placé au-dessus d'une surface plane (cf. figure 3.4). Dans ce cas, pour trois points consécutifs de la surface plane mesurée (P_{m-1} , P_m et P_{m+1}), on a $\Delta x_m = \Delta x_{m-1} = d$ dans l'équation 3.18, où d est le pas inter-éléments du capteur. En supposant ensuite une erreur de mesure δz_m sur l'altitude du point P_m , alors $\Delta z_m = \Delta z_{m-1} = \delta z_m$ dans l'équation 3.18 et le rayon R_m s'exprime simplement comme :

$$R_m = \frac{d^2}{\delta z_m}. \quad (3.19)$$

Pour une surface plane, l'erreur de mesure minimale peut être rattachée à la variation de bande passante d'un élément à l'autre. Le rayon de courbure minimal R_{min} est alors estimé par :

$$R_{min} = \frac{d^2 BP}{v_e}, \quad (3.20)$$

où BP est la bande passante moyenne du capteur à -6 dB.

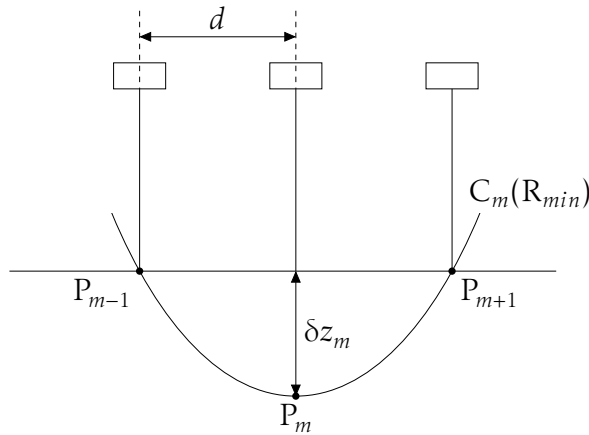


FIGURE 3.4 – Estimation du rayon de courbure minimal R_{min} au point P_m d'une surface plane, δz_m est l'erreur de mesure sur l'altitude z_m du point P_m .

Pour illustrer l'influence de ce filtrage sur la mesure de surface, on s'intéresse à la configuration décrite sur la figure 3.9a. Il s'agit d'une maquette en acier dont la surface irrégulière représente une vague de meulage, forme qui peut être obtenue après arasement d'une soudure. Un capteur de 64 éléments (pas inter-éléments : 0,8 mm, fréquence centrale : 2 MHz, BP : $0,8f_c$ à -6 dB) est utilisé pour réaliser une acquisition STA. On applique ensuite la méthode Pitch-Catch pour reconstruire la surface. La figure 3.5a représente le nuage de points obtenu lorsque la méthode Pitch-Catch est appliquée en conservant la totalité des N^2 signaux (pas de seuil). On observe un grand nombre de points mal positionnés, provenant de l'utilisation de signaux proches du bruit électronique. La courbe représentative de la surface, obtenue en appliquant un

seuil en amplitude à -6 dB est reporté sur la figure 3.5b. On note que la plupart des points de mesure erronés ont été supprimés. Les points restant sont principalement situés sur les parties les moins complexes de la surface, et certains points s'écartent encore nettement du profil. Ces derniers sont éliminés en appliquant le filtrage par rayon de courbure (cf. figure 3.5c) avec $R_{min} = 0,5$ mm d'après l'équation 3.20. Il est à noter que le nombre de points est significativement réduit : 3969 points sans seuil en amplitude, 91 points avec seuillage, et enfin 243 avec seuillage et lissage par R_{min} .

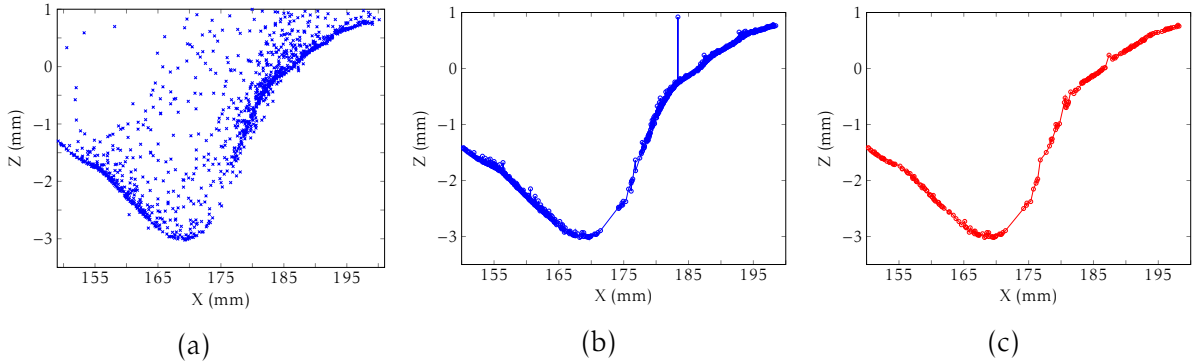


FIGURE 3.5 – Influence du lissage sur la mesure de surface par la méthode Pitch-Catch (a) sans seuil sur les signaux, (b) seuil à -6 dB sans lissage et (c) avec lissage ($R_{min} = 0,5$ mm).

2.1.3 Méthode SAUL

La méthode SAUL (pour Surface Adaptive ULtrasounds [51]) est un algorithme adaptatif développé au CEA pour le contrôle de pièces composites de formes complexes. L'objectif de cette technique est d'émettre dans l'eau une onde dont le front incident est parallèle à la surface complexe. La transmission de l'onde dans le matériau est donc assurée en incidence normale en tous points de la surface, ce qui permet de limiter les effets de l'anisotropie. Ce résultat est obtenu grâce à un algorithme itératif qui ne requiert pas la connaissance de la géométrie de la structure composite. Puisque cette méthode adapte l'émission à la géométrie de la surface, il est ensuite possible de la déterminer.

Le principe de la méthode SAUL est illustré sur la figure 3.6. La première étape est la transmission d'une onde plane dans l'eau en excitant simultanément tous les éléments (figure 3.6a). L'onde réfléchiée par la surface est reçue par tous les éléments du capteur et les N temps de vols entre la surface et les récepteurs sont mesurés (figure 3.6b). Une loi de retards est ensuite calculée à partir de ces temps de vol et sert à transmettre une nouvelle onde plus ou moins adaptée à la surface selon sa complexité (figure 3.6c). Le processus est répété jusqu'à convergence où le front d'onde émis est strictement parallèle à la surface.

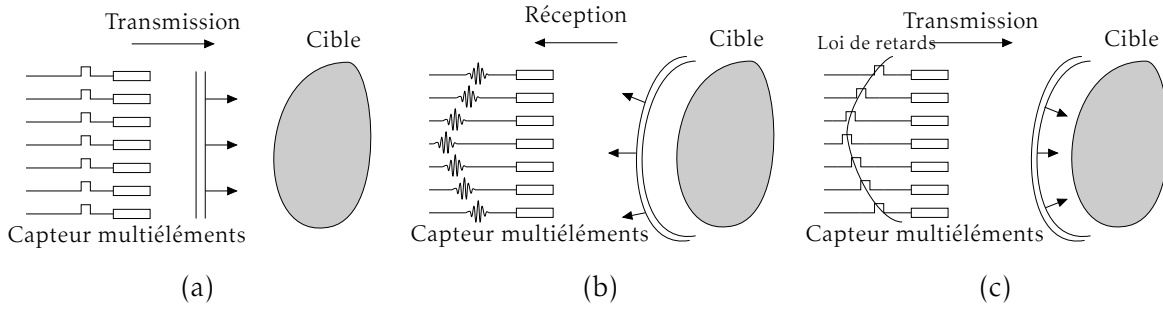


FIGURE 3.6 – Principe d'une itération de la méthode SAUL : (a) une onde plane est transmise en excitant tous les éléments du capteur, (b) les ondes réfléchies sont reçues par la sonde et les temps de vols entre les éléments et la surface sont mesurés et (c) une loi de retards est obtenue à partir de ces temps de vols et est appliquée lors d'un second tir pour obtenir un front d'onde quasi parallèle à la surface.

Les retards à l'émission (E_i) et en réception (R_i) appliqués à un élément i ($1 \leq i \leq N$, où N est le nombre total d'éléments) sont complémentaires et définis par :

$$\begin{cases} E_i^{(j+1)} &= E_i^{(j)} + e_i^{(j)} - \min_{i=1}^N (E_i^{(j)} + e_i^{(j)}) \\ e_i^{(j)} &= \frac{1}{2} \left[\max_{i=1}^N (t_i^{(j)}) - t_i^{(j)} \right] \\ R_i^{(j)} &= \max_{i=1}^N (E_i^{(j+1)}) - E_i^{(j+1)} \end{cases}, \quad (3.21)$$

où $j = 1, 2, \dots$ représente l'ordre d'itération ($j = 1$ correspond à la première transmission avec $E_i^{(1)} = 0 \quad \forall i$ et $t_i^{(j)}$ est le temps de vol mesuré pour l'élément i et l'itération j). L'équation 3.21 exprime la sommation des lois de retards, itération après itération, jusqu'à la convergence, c'est-à-dire jusqu'à ce que les retards ne soient plus modifiés entre deux itérations successives. Ceci est généralement le cas après 4 ou 5 transmissions. Lorsque la méthode a convergé, il est possible de retrouver les temps de vol mesurés en balayage électronique simple (cf. 2.1.1). Ces temps de vol sont donnés par :

$$t'_i = t_i - 2E_i + \max(E_i), \quad (3.22)$$

avec t'_i le temps de vol spéculaire et t_i et E_i le temps de vol et le retard en transmission calculés pour l'élément i après convergence de l'algorithme. Une fois les temps de vol spéculaires connus, la surface peut être déterminée de la même manière qu'en 2.1.1. Le nombre de points de mesure est identique à la méthode Pulse-Echo, soit $(N - 1)$, cependant le nombre de tirs pour mesurer la surface ne dépend plus du nombre d'éléments, mais du nombre d'itérations dans la méthode SAUL.

2.1.4 Méthode STA

La dernière méthode de mesure de surface, développée dans le cadre de la thèse de Souad BANNOUNF [52], est celle basée sur l'imagerie STA. On rappelle que l'amplitude en un point P de l'image est donnée par l'équation (cf. chapitre 1 sous-section 4.5) :

$$A(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Gamma_i^P \Gamma_j^P s_{ij}(t_i^P + t_j^P) \right|, \quad (3.23)$$

où $s_{ij}(t) = k_{ij}(t) + jH(k_{ij}(t))$. À la différence du chapitre précédent, on considère ici un milieu constitué exclusivement d'eau. Par conséquent, les exposants (e) et (r) ne sont plus utiles puisque les trajets en émission et réception sont identiques et qu'un seul type d'onde se propage dans l'eau. De même, les pondérations sont identiques en émission et réception et sont exploitées dans la suite pour améliorer la qualité de l'image dans l'eau.

Le principe de mesure de surface avec l'algorithme STA est illustré sur la figure 3.7. Il consiste à réaliser une image STA sous le capteur et à en extraire la surface en relevant le maximum de l'amplitude sur chaque colonne. La zone d'intérêt est centrée sur l'altitude moyenne H de la surface complexe.

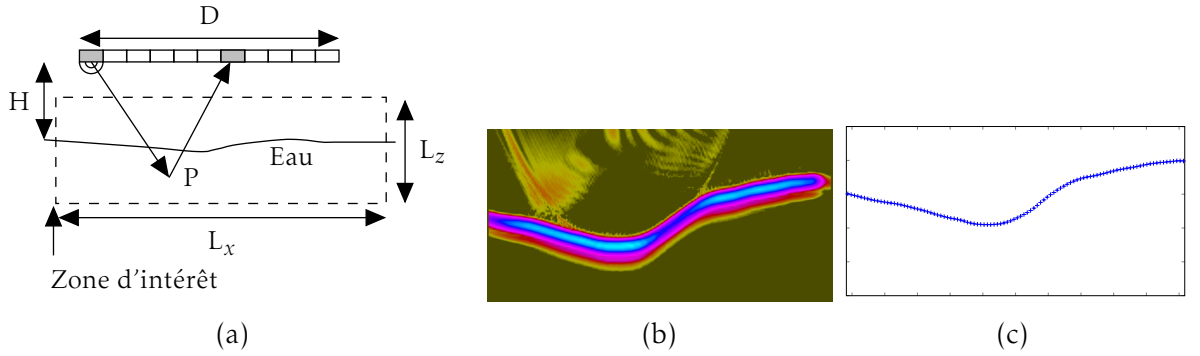


FIGURE 3.7 – Mesure de surface par la méthode STA : (a) l'algorithme d'imagerie est appliqué en considérant un milieu constitué uniquement d'eau, (b) une image de la surface est obtenue et (c) la géométrie de la surface est extraite.

En général, un capteur multiéléments est optimisé pour former une image de qualité dans le solide. Le découpage multiéléments respecte donc la condition $d \leq \lambda_s/2$ (avec d le pas interéléments du réseau et λ_s la longueur d'onde dans le solide), pour éviter l'apparition de lobes de réseau [53]. Cependant, ce critère n'est plus respecté lorsque l'on calcule une image dans l'eau avec ce même capteur ($d > \lambda_e$), et des lobes de réseau apparaissent à des angles proches du lobe principal. Les lobes de réseau engendrent du bruit dans l'eau, au-dessus de la surface, pouvant gêner la mesure. Pour limiter leur influence, les signaux sont pondérés, en émission et réception, par la directivité des éléments (cf. chapitre 1, 2.5.1). Les coefficients de pondération Γ_i^P sont donc donnés par [54] :

$$\Gamma_i^P = \frac{\sin(k \frac{a}{2} \sin \theta_i^P)}{k \frac{a}{2} \sin \theta_i^P} \cos \theta_i^P, \quad (3.24)$$

où θ_i^P est l'angle entre l'émetteur et le point de calcul P, k est le nombre d'onde et a la largeur d'un élément. L'influence de la pondération par la directivité élémentaire est illustrée sur la figure 3.8 et on observe que l'amplitude du bruit dans l'eau diminue d'environ 8 dB sans altérer l'image de la surface.

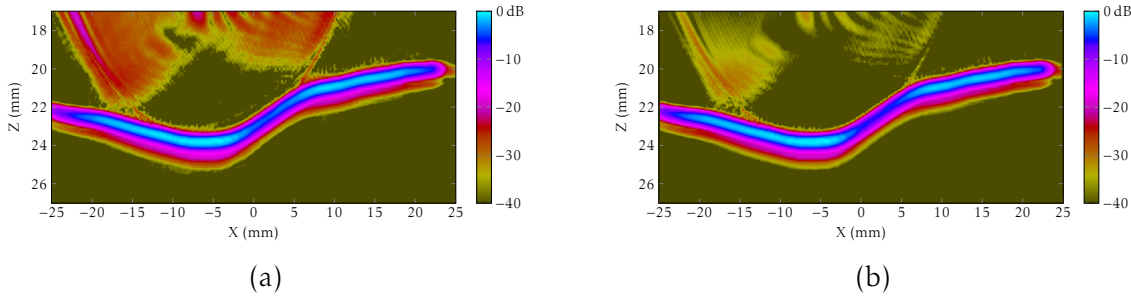


FIGURE 3.8 – Réduction du bruit dû aux lobes de réseau : (a) image STA obtenue sans pondération et (b) avec pondération par la directivité élémentaire.

Pour que la mesure de surface soit correcte, il convient de bien définir le maillage minimal de l'image STA (le rendu de l'image peut ensuite être amélioré en affinant le maillage par une interpolation bilinéaire ou bicubique entre les pixels). Suivant la direction X, le maillage minimal est lié à la résolution latérale (cf. chapitre 1, section 3). Deux détails de la surface séparés d'une distance inférieure à la résolution latérale du réseau ne peuvent pas être distingués. Par conséquent, le pas minimal Δx peut-être donné par :

$$\Delta x = \frac{\lambda_e H}{D} = \frac{v_e H}{f_c D}, \quad (3.25)$$

en rappelant que v_e est la vitesse de l'onde dans l'eau, H est l'altitude moyenne de la surface complexe, f_c est la fréquence centrale du capteur et D est l'ouverture totale du capteur. Définir un maillage minimal suivant la profondeur Z revient à échantillonner correctement les signaux $k_{ij}(t)$. Le critère de SHANNON impose que $f_e \geq 2f_{max}$, avec f_e la fréquence d'échantillonnage et f_{max} la fréquence maximale émise par le capteur. En partant de l'hypothèse que le maillage suivant Z doit respecter le critère de SHANNON, le pas Δz doit être au moins égal à :

$$\Delta z = \frac{v_e}{2f_e} = \frac{v_e}{4f_{max}}, \quad (3.26)$$

avec $f_{max} = f_c(1 + BP/2)$, où BP est la bande passante du capteur à -6 dB. Si ces deux critères de maillage sont respectés, alors l'information essentielle sur la surface est contenue dans l'image. Par exemple, pour un capteur d'ouverture $D = 50$ mm

($f_c = 2\text{ MHz}$, $BP = 0,8f_c$) et une surface complexe variant autour de la profondeur $H = 20\text{ mm}$, les pas Δx et Δz valent respectivement $0,3\text{ mm}$ et $0,13\text{ mm}$.

Comme pour la méthode Pitch-Catch, la mesure de surface par imagerie STA nécessite N transmissions. Elle est moins sensible aux erreurs de mesure de temps de vol et le nombre de points de la surface ne dépend pas des caractéristiques du capteur.

2.2 Comparaison des méthodes de mesure de surface

Les différentes méthodes de mesure de surface ont été comparées avec trois maquettes en acier présentant diverses géométries de surface. Elles correspondent aux formes complexes souvent rencontrées en CND : une surface irrégulière représentative d'une vague de meulage, une géométrie concave d'une jonction de tuyauterie et une surface convexe d'un bourrelet de soudure (cf. figure 3.9). Le même capteur, composé de 64 éléments (pas interélément : $0,8\text{ mm}$, fréquence centrale : 2 MHz), est utilisé pour toutes les acquisitions. La surface complexe varie autour d'une profondeur moyenne de 20 mm .

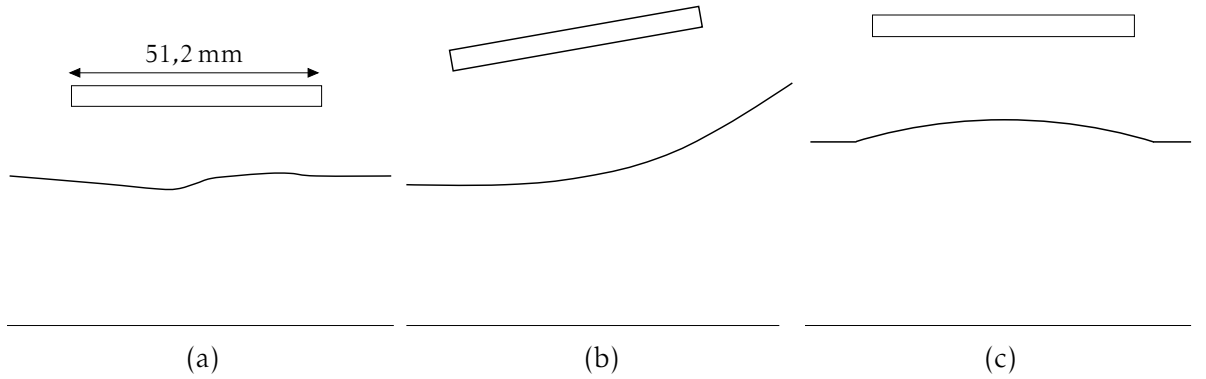


FIGURE 3.9 – Maquettes en acier présentant différentes géométries de surface. (a) Surface irrégulière d'une vague de meulage, (b) surface concave d'une jonction de tuyauterie et (c) géométrie convexe d'un bourrelet de soudure.

Une imprécision sur la mesure du profil par rapport au profil réel peut introduire des erreurs dans le calcul des temps de vol ou des lois de retards et affecter significativement l'image finale dans le matériau. Cependant, il n'est pas possible de définir un critère générique d'acceptabilité de l'erreur de mesure car cela dépend d'une multitude de paramètres (propriétés du capteur, géométrie de la pièce, ...). On peut seulement estimer la valeur d'une erreur maximale tolérable au-dessus d'une surface plane pour un capteur donné. Dans ce cas, le déphasage entre les signaux émis par deux émetteurs d'un réseau doit être inférieur à $\pi/4$ pour qu'il n'y ait pas d'interférence destructive, ce qui donne une erreur maximale Δz_m sur l'altitude de la surface :

$$\Delta z_m = \frac{v_s - v_e}{16f_c}, \quad (3.27)$$

où v_s est la vitesse dans le solide. Avec $f_c = 2 \text{ MHz}$, $v_e = 1,5 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ et $v_s = 5,7 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, on admettra dans la suite que l'erreur quadratique moyenne entre le profil réel et celui mesuré ne doit pas dépasser $\Delta z_m = 0,1 \text{ mm}$.

Les géométries de surface obtenues avec les quatre méthodes sont superposées sur la figure 3.10 et sont comparées au profil réel fourni par l'usineur. On constate que les profils mesurés pour les surfaces concaves (cf. figure 3.10b) et convexe (figure 3.10c) sont identiques au profil réel avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 0,01 mm. Les résultats pour la vague de meulage (cf. figure 3.9a) montrent que les méthodes Pulse-Echo et SAUL sont moins robustes en présence d'une concavité de faible rayon de courbure. L'erreur quadratique moyenne pour ces deux méthodes reste inférieure à la limite (0,05 et 0,08 mm respectivement), mais les deux profils autour de $x = 0 \text{ mm}$ (cf. figure 3.10a) s'éloignent sensiblement du profil réel de 0,2 et 0,22 mm respectivement. Une focalisation utilisant ces profils est toujours possible, avec, cependant, une possible dégradation dans l'estimation du temps de vol pour les rayons passant par cette zone. Les deux autres méthodes (Pitch-Catch et STA) donnent des profils plus proches de la surface réelle avec une erreur quadratique moyenne d'environ 0,02 mm. Ceci est dû à la prise en compte de trajets non-spéculaires qui donnent plus d'information sur la géométrie. Les erreurs mesurées pour chaque profil sont reportées dans le tableau 3.1.

	Erreur quadratique moyenne (mm)			
	Pulse-Echo	Pitch-Catch	SAUL	STA
Vague de meulage	0,05	0,02	0,08	0,02
Jonction de tuyauterie	0,02	0,01	0,02	0,01
Bourrelet de soudure	0,03	0,02	0,03	0,01

TABLE 3.1 – Erreurs quadratiques moyennes relevées sur les profils mesurés.

Le tableau 3.2 affiche pour chaque méthode le nombre de tirs, de signaux à stocker et de points de mesure de la surface. Il permet de cerner rapidement les avantages et inconvénients des différentes méthodes : rapidité (en lien avec le nombre de tirs), espace mémoire nécessaire (en lien avec le nombre de signaux stockés) et précision de la mesure (en lien avec le nombre de points de mesure).

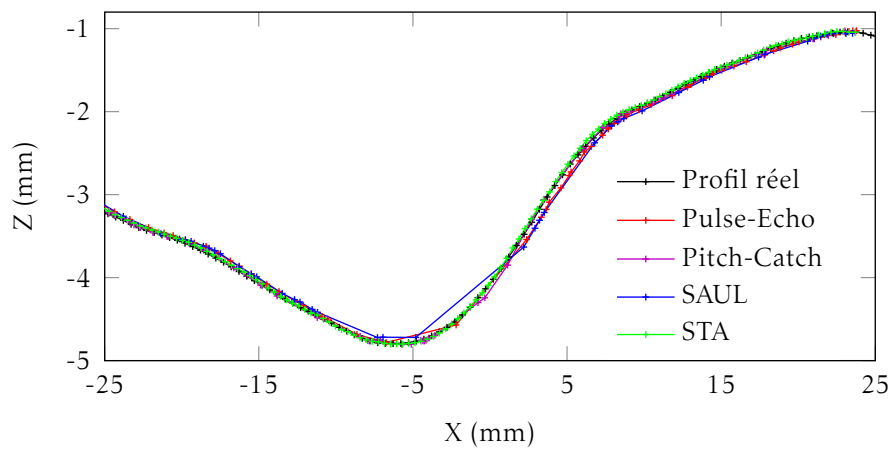
Parmi les quatre méthodes de mesure évaluées, la méthode SAUL est la plus rapide mais semble être la moins robuste dans le cas de géométries avec des petits rayons de courbure. Les méthodes Pitch-Catch et STA donnent les meilleurs résultats mais la première est sensible aux erreurs de mesure des temps de vol, tandis que la seconde nécessite plus de temps de calcul.

Dans la suite de ce manuscrit, la méthode retenue est celle basée sur l'algorithme STA car elle évite des erreurs de mesure de temps de vol et donne une description précise de la surface. Contrairement à SAUL, cette méthode nécessite une seule acquisition (la matrice $\mathbf{K}(t)$) pour obtenir la géométrie de surface et l'image des défauts dans le

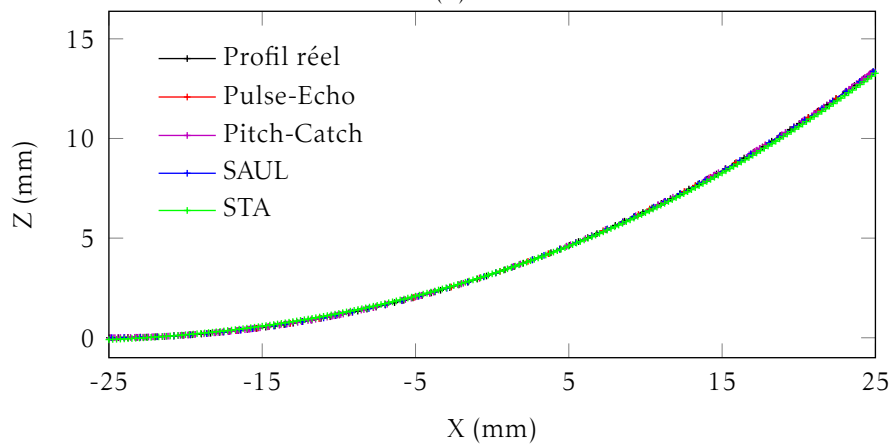
	Nombre de tirs	Nombre de signaux à stocker	Nombre de points de mesure
Pulse-Echo	N	N	$\leq N - 1$
Pitch-Catch	N	N^2	$\leq (N - 1)^2$
SAUL	4 – 5	N	$\leq N - 1$
STA	N	N^2	$\geq L_x Df_c / (v_e H)$

TABLE 3.2 – Récapitulatif des grandeurs caractéristiques des méthodes de mesure de surface : nombre de tirs, de signaux à stocker et de points de mesure.

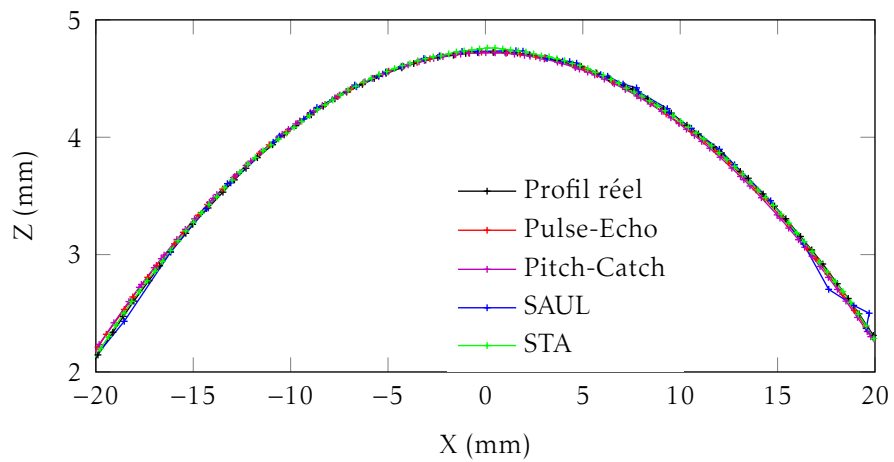
matériau. Il s'agit aussi d'une méthode plus intuitive car elle fournit une image de la surface, facilement interprétable.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.10 – Comparaison des profils mesurés avec le profil réel pour trois types de géométrie : (a) vague de meulage, (b) jonction de tuyauterie et (c) bourrelet de soudure.

3 Imagerie STA adaptative

Cette section présente une méthode adaptative basée sur l'algorithme STA. Dans cette méthode, la matrice des réponses impulsionnelles interéléments $\mathbf{K}(t)$ est post-traitée une première fois pour imaginer et mesurer la surface, et une seconde fois pour imaginer le matériau (après calcul des trajets ultrasonores au travers de la surface mesurée). Comme il a été montré dans la section précédente, la mesure de surface par imagerie STA est l'une des deux méthodes (avec la méthode Pitch-Catch) donnant les meilleurs résultats. Cependant, c'est la méthode la moins rapide, car la mesure de surface repose sur le calcul d'une image dans l'eau. C'est pourquoi, pour limiter le temps de calcul de l'image de la surface, la méthode de mesure par imagerie STA a été optimisée.

3.1 Optimisation de la mesure de surface par la méthode STA

Comme la méthode STA repose sur le traitement de la matrice $\mathbf{K}(t)$, lorsque le nombre d'éléments du capteur est important ($N \geq 64$), le temps de calcul de l'image dans l'eau devient excessivement long du fait du nombre de tirs, du nombre de signaux à traiter (N^2) et du nombre de pixels à calculer ($\geq L_x D f_c / (v_e H) \times v_e / (4 f_{max})$). Cependant, lorsque la sonde est large, certains signaux sont proches du bruit électro-nique et ne sont donc pas utiles. Pour confirmer cela, un capteur de $N = 64$ éléments (pas interéléments $d = 0,8$ mm, fréquence centrale 2 MHz) est placé au-dessus de la maquette représentative de la vague de meulage (cf. figure 3.11) pour réaliser une acquisition STA.

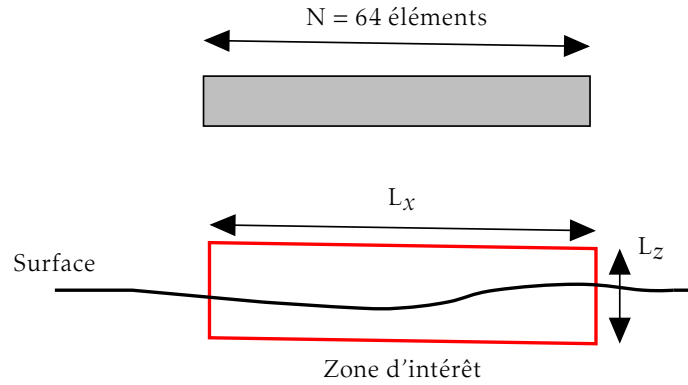


FIGURE 3.11 – Optimisation de la mesure de surface par la méthode STA : un capteur composé de 64 éléments est placé au-dessus d'une maquette dont la surface représente une vague de meulage. La zone d'intérêt mesure $L_x = 51$ mm par $L_y = 10$ mm.

La zone image couvre la largeur D du capteur et a pour dimensions 51×10 mm². Elle est discrétisée en $n_x = 174$ par $n_z = 80$ pixels, soit des pas $\Delta x = 0,29$ mm et $\Delta z = 0,13$ mm (cf. 2.1.4). Une image STA classique serait donc obtenue en réalisant

environ $5,7 \times 10^7$ sommations de signaux ($N \times N \times n_x \times n_z = 64 \times 64 \times 174 \times 80$). Or, si l'on regarde la contribution d'une paire d'éléments très éloignés l'un de l'autre, on constate qu'elle n'apporte pas d'information utile. C'est ce que l'on observe sur la figure 3.12 affichant le B-Scan voies (cf. chapitre 1, sous-section 4.1) obtenu en émettant avec le premier élément du capteur. En comparant les signaux reçus par les premier et dernier éléments (cf. figure 3.12b et c), on constate que le signal enregistré par l'élément n° 64 correspond à du bruit électronique. Le signal $k_{1/64}(t)$ est donc inutile à la mesure de la surface.

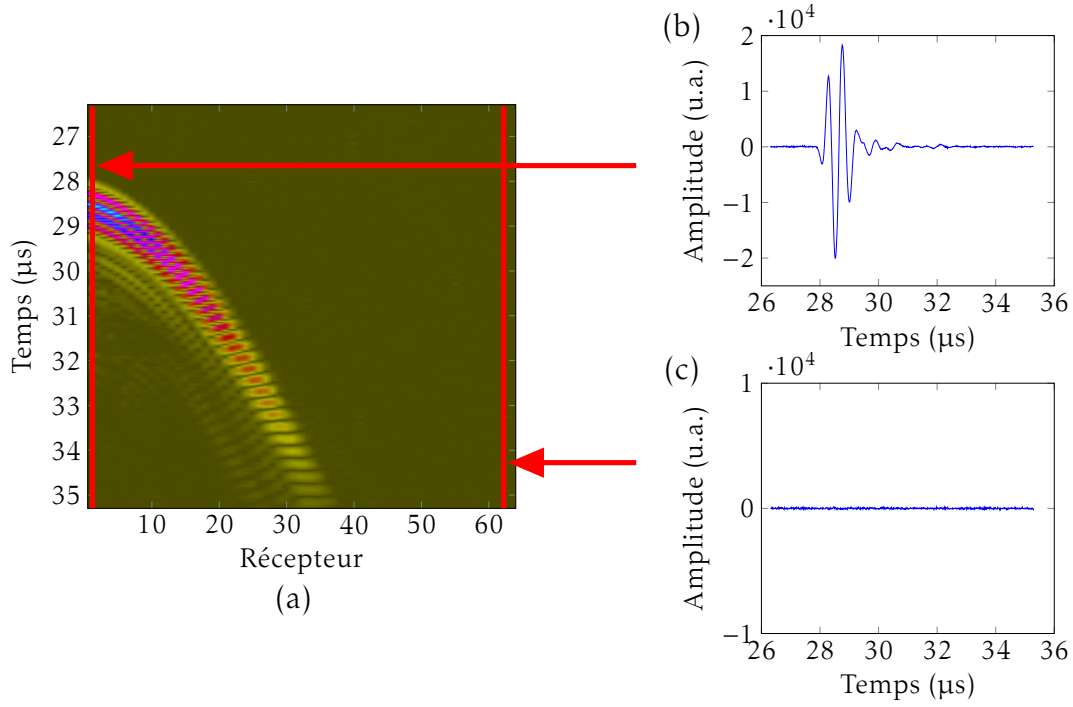


FIGURE 3.12 – Contribution des signaux élémentaires. (a) B-Scan voies lorsque l'élément n° 1 émet, (b) A-Scan voie $k_{1/1}(t)$ et (c) A-Scan voie $k_{1/64}(t)$.

Il faut donc déterminer quels sont les signaux utiles contribuant à la mesure de la surface. Pour cela, un seuil en amplitude est défini pour chaque émission i . Ensuite, l'amplitude maximale est mesurée parmi les N signaux $\hat{k}_{ij}(t)$ (ou $\hat{k}_{ij}(t)$ représente l'enveloppe du signal $k_{ij}(t)$). Le seuil est fixé comme une fraction de ce maximum, à -6 dB :

$$\text{Seuil}_i = \frac{\max_{j=1}^N \left(\hat{k}_{ij}(t) \right)}{2}, \quad (3.28)$$

et seuls les signaux ayant une amplitude maximale supérieure à ce seuil sont enregistrés. Il est nécessaire d'avoir un seuil variable en fonction de l'émetteur (c'est-à-dire qui change entre chaque transmission) car la complexité de la surface mène à de larges variations de l'amplitude. Prendre un seuil unique pour toutes les émissions risquerait d'éliminer des signaux utiles à la mesure.

La figure 3.13 montre deux exemples de représentation de la matrice $\mathbf{K}(t)$, dans lesquels le seuil a été fixé à -6 dB. L'axe des abscisses correspond aux numéros des émetteurs, tandis que l'axe des ordonnées indique ceux des récepteurs. Chaque pixel de l'image représente donc un couple émetteur/récepteur. Les figures 3.13a et 3.13b sont obtenues respectivement pour une surface plane et une surface complexe.

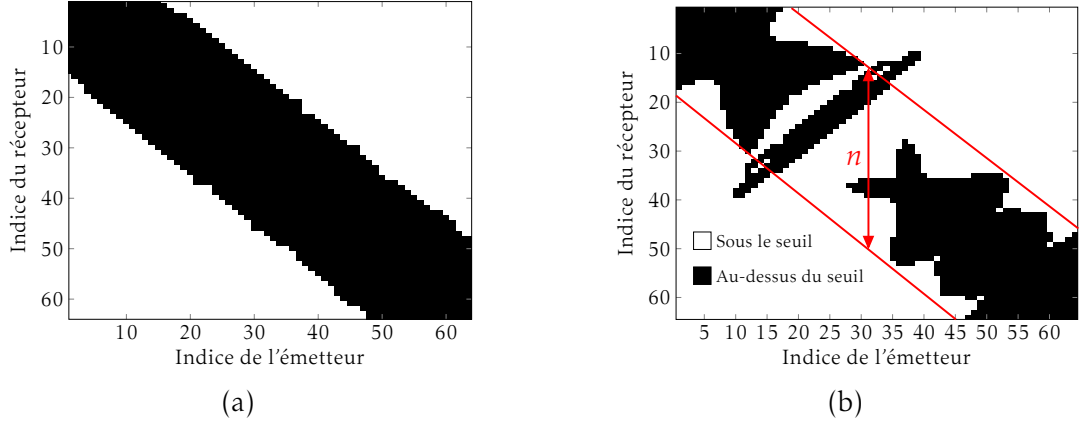


FIGURE 3.13 – Nombre de signaux $k_{ij}(t)$ contribuant à la mesure de la surface : représentation de la matrice $\mathbf{K}(t)$ après seuillage à -6 dB sur (a) une surface plane et (b) une surface complexe. On note que seuls les éléments situés dans une bande autour de la diagonale contribuent significativement à la mesure.

Les pixels blancs et noirs représentent les signaux se situant respectivement en dessous et au-dessus du seuil. On observe qu'une part importante de signaux sont sous le seuil ($\approx 68\%$ pour la partie complexe). Le nombre de paires émetteur/récepteur considérées dans la sommation peut donc être réduit de presque 70 %, ce qui se traduit par une diminution significative des temps de calcul de l'image dans l'eau. Ces figures montrent que les récepteurs qui contribuent significativement à la mesure se situent dans une zone autour de la diagonale de la matrice. La hauteur n de cette zone indique le nombre d'éléments utiles en réception pour chaque émetteur. Pour la configuration décrite sur la figure 3.9a, au plus 33 éléments adjacents sont conservés en réception pour chaque transmission.

Pour accélérer encore le calcul de l'image dans l'eau, il n'est pas utile de calculer à chaque émission i l'intégralité de l'image de dimension $L_x \times L_z$. On peut se limiter à une petite zone centrée autour de l'émetteur i et dont la largeur est fixée par le nombre d'éléments récepteurs n , déterminé selon le principe de seuillage décrit ci-dessus. La largeur de cette image partielle est $L'_x = n \times d$ et elle comprend n'_x points suivant l'axe x ($n'_x < n_x$ pixels). Pour obtenir l'image complète de la surface sous le capteur, la sous-ouverture est déplacée le long de celui-ci avec un pas de 1 élément (cf. figure 3.14).

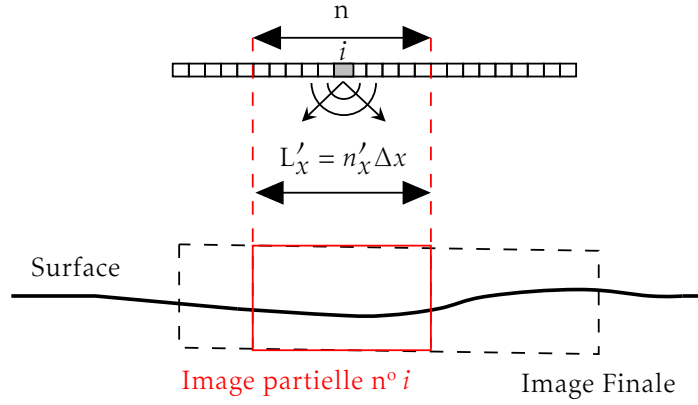


FIGURE 3.14 – Imagerie STA glissante : une image est calculée sous la sous-ouverture définie par le nombre d'éléments n qui contribuent à la mesure pour l'émission i , puis cette sous-ouverture est déplacée le long du capteur.

L'image STA complète est calculée de la manière suivante :

$$A(P) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=i-\frac{n-1}{2}}^{i+\frac{n-1}{2}} \Gamma_i^P \Gamma_j^P s_{ij}(t_i^P + t_j^P) \right|, \quad (3.29)$$

avec $s_{ij}(t) = 0 \forall t$ si $i - \frac{n-1}{2} < 1$ ou $i + \frac{n-1}{2} > N$. Avec ce principe d'image STA glissante, l'image finale est obtenue en réalisant 1×10^7 sommations de signaux $s_{ij}(t)$ ($N \times n \times n'_x \times n_z + N = 64 \times 33 \times 66 \times 80 + 64$), soit 5 fois moins qu'avec la méthode classique (méthode STA avec pondérations). Il faut également noter que les $n \times n'_x \times n_z$ temps de vol pour calculer une image partielle sont indépendants de l'émetteur i . Ainsi, par rapport à la méthode classique, le nombre de temps de vol à calculer et à stocker en mémoire est de $33 \times 66 \times 80$, soit une réduction d'un facteur 5 également.

Les figures 3.15a et 3.15b montrent que les images de la surface réalisées avec les méthodes classique et glissante sont quasi identiques. On observe même une diminution du bruit dans l'eau avec la méthode glissante, due sans doute à l'élimination des lobes de réseaux par la fenêtre glissante.

La figure 3.16, dans laquelle le profil fourni par l'usineur (o) est superposé aux profils obtenus avec les deux méthodes STA (classique : + ; glissante : x), montre que les profils extraits des deux images se superposent parfaitement. L'erreur quadratique moyenne pour les profils mesurés par STA classique et glissante est de 0,02 mm. On peut donc en conclure que la méthode de mesure de surface par STA glissante conserve la qualité de la méthode STA classique, tout en réduisant fortement le temps de calcul de l'image et le nombre de temps de vol à stocker en mémoire.

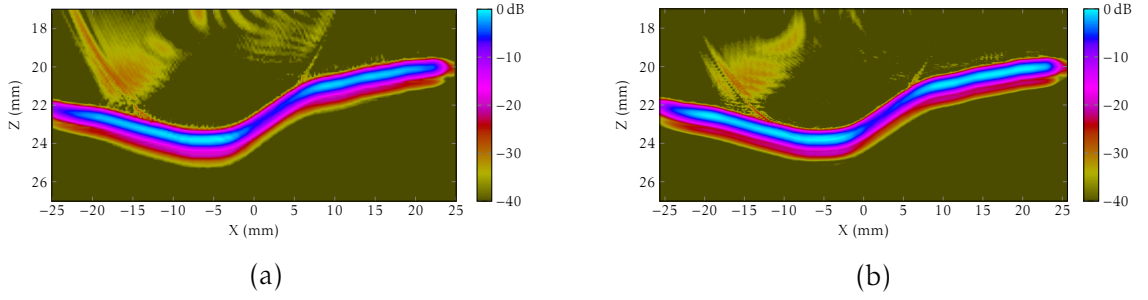


FIGURE 3.15 – Image d’une surface complexe avec un capteur composé de 64 éléments avec la méthode : (a) STA classique et (b) glissante.

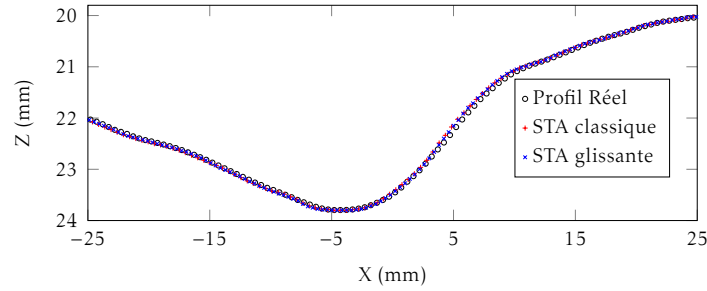


FIGURE 3.16 – Comparaison du profil réel (o) avec le profil mesuré par la méthode STA classique (+) et glissante (x).

3.2 Méthode de calcul des trajets à travers une surface complexe

Après la mesure de surface, l’algorithme STA classique est appliqué au même jeu de données pour réaliser une seconde image sous la surface. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer les temps de vol entre les éléments et les points de focalisation en prenant en compte la surface complexe mesurée dans l’algorithme de méthode de gradient présenté au chapitre 2. En notant $z = s(x)$ la fonction représentative de la surface mesurée avec n_x points de mesure, le temps de vol entre un émetteur E et un point P de l’image s’écrit :

$$t_i^e(x_e) = \frac{\sqrt{(x_e - X_e)^2 + s(x_e)^2}}{v_e} + \frac{\sqrt{(X_P - x_e)^2 + (Z_P - s(x_e))^2}}{v_s}. \quad (3.30)$$

Comme dans le chapitre 2, l’application du principe de FERMAT conduit à déterminer les abscisses x_e du point I_e de la surface qui minimise ce temps de vol (cf. figure 3.17). La solution est déterminée numériquement en appliquant l’algorithme itératif de descente de gradient :

$$x_e^{(k+1)} = x_e^{(k)} - \frac{\left(t_i^e(x_e^{(k)}) \right)'}{\left(t_i^e(x_e^{(k)}) \right)''}. \quad (3.31)$$

La valeur initiale $x_e^{(k=0)}$ de la suite peut être choisie comme l'abscisse X_e de l'émetteur E si la vitesse de propagation dans l'eau est nettement inférieure à celle dans le matériau. À une itération $k \neq 0$, si $x_e^{(k)}$ ne correspond pas à l'un des n_x points de mesure de la surface, l'altitude $z_e^{(k)}$ est déterminée en interpolant $z = s(x)$ (interpolation linéaire, polynomiale ou par splines selon les cas).

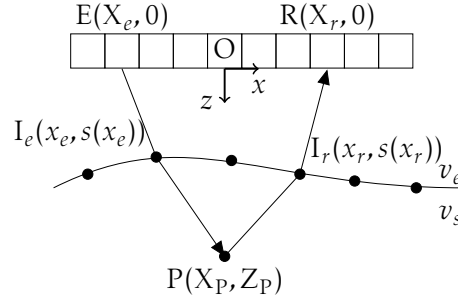


FIGURE 3.17 – Calcul des trajets à travers une interface complexe. Par rapport au chapitre 2, les altitudes $z_e = s(x_e)$ et $z_r = s(x_r)$ des points d'impact I_e et I_r ne sont plus constante.

On voit que la position du point d'impact dépend de la surface $s(x_e)$. Il faudrait donc déterminer une fonction dérivable permettant de décrire toutes les surfaces susceptibles d'être rencontrées en CND, ce qui n'est pas possible. L'astuce utilisée ici et qui apporte une résolution générique, est de calculer les dérivées par différences finies. En notant δx le pas numérique (avec $\delta x \ll \Delta x$) :

$$\begin{cases} t_i^{e'}(x_e^{(k)}) & \approx \frac{t(x_e^{(k)} + \delta x) - t(x_e^{(k)} - \delta x)}{2\delta x} \\ t_i^{e''}(x_e^{(k)}) & \approx \frac{t(x_e^{(k)} + \delta x) - 2t(x_e^{(k)}) + t(x_e^{(k)} - \delta x)}{\delta x^2} \end{cases} \quad (3.32)$$

La manière la plus rigoureuse de calculer les temps de vol est d'imposer un test de convergence pour tous les couples émetteur/pixel. Le critère de convergence retenu est le taux d'accroissement du temps de vol calculé (τ), entre deux itérations de la méthode :

$$\tau = \left| \frac{t_i^e(x_e^{(k)}) - t_i^e(x_e^{(k-1)})}{t_i^e(x_e^{(k)})} \right|. \quad (3.33)$$

Comme il y a $N \times n_x \times n_z$ temps de vol à calculer pour constituer une image et que le nombre d'itérations peut potentiellement varier d'un temps de vol à l'autre, laisser converger la méthode pour chaque couple E/P peut être long. Des tests ont donc été effectués pour déterminer le nombre d'itérations minimal pour que la méthode converge quel que soit le couple E/P. La configuration de test est identique à celle présentée sur la figure 3.11 (même position et même capteur). Les cartographies

de temps de vol pour une zone d'intérêt, associées aux émetteurs n^{os} 1, 32 et 64, sont présentée sur les figures 3.18a à 3.18c. Ces figures ont été obtenues en laissant converger la méthode en imposant le critère de convergence $\tau < 0.001$. Le nombre d'itérations nécessaire pour atteindre la convergence pour chaque couple E/P (E = 1, 32 et 64) est indiqué sur les figures 3.18d à 3.18f. On observe que même avec un critère de convergence strict, la méthode converge en quelques itérations (5) quels que soient l'émetteur ou le point de calcul. Par conséquent, dans la suite de ce chapitre, les trajets et les temps de vol seront déterminés en fixant le nombre d'itérations à 5, quel que soit le couple E/P.

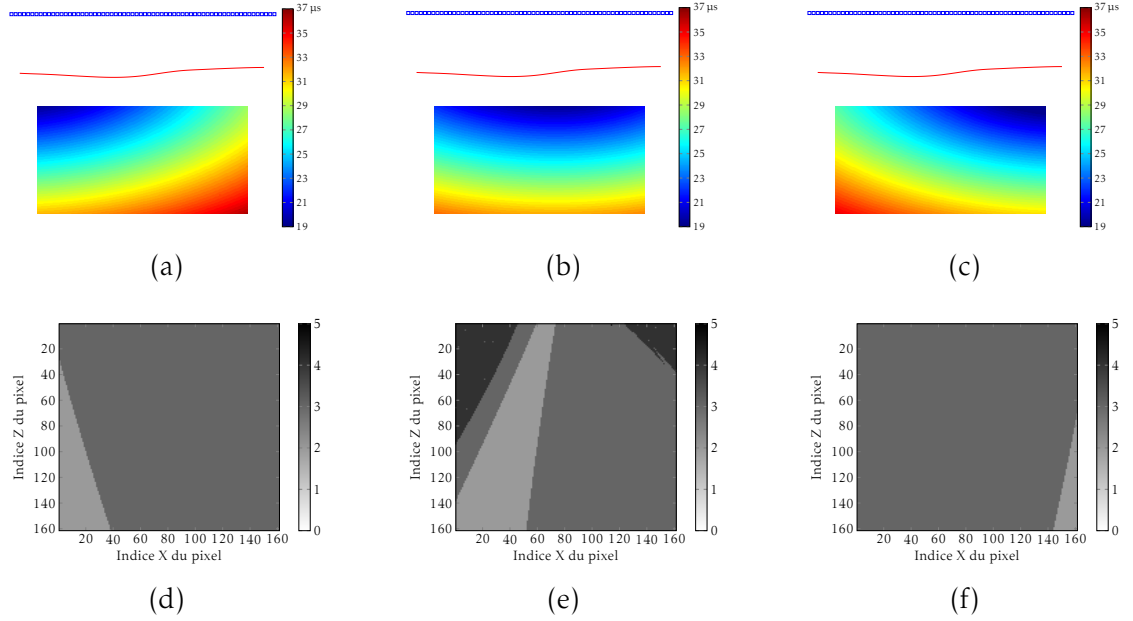


FIGURE 3.18 – Convergence de la méthode de descente de gradient pour les éléments n^{os} 1, 32 et 64 : (a, b et c) cartographies de temps vol obtenues après convergence de la méthode ($\tau < 0.001$) et (d, e et f) nombre d'itérations pour atteindre la convergence en fonction du point de calcul.

L'algorithme de descente de gradient donne le temps de vol minimal en calculant la position du point d'impact I_e . Par conséquent, il est possible de représenter les trajets correspondant aux temps de vol calculés. C'est ce qui est fait sur la figure 3.19, qui présente les trajets calculés à l'aide de l'algorithme de descente de gradient entre tous les éléments d'un capteur et un point de calcul P sous la surface complexe, après 5 itérations.

Pour compléter le test sur la convergence, des calculs de faisceaux focalisés ont été menés avec le logiciel CIVA. La géométrie de surface, définie dans CIVA est celle déterminée par la méthode STA exposée dans la sous-section 3.1. Le premier faisceau (cf. figure 3.20a) est le résultat de référence car la loi de retards appliquée est issue des trajets calculés par simulation du champ rayonné dans la pièce [55]. L'autre faisceau (cf. figure 3.20b) correspond au calcul de la loi de retards à partir

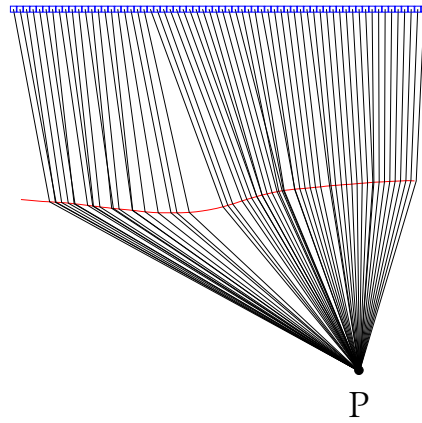


FIGURE 3.19 – Trajets calculés par l'algorithme de descente de gradient (5 itérations) entre tous les éléments d'un capteur et un point de calcul P sous la surface complexe.

des trajets déterminés par l'algorithme de descente de gradient avec 5 itérations. On observe que le faisceau obtenu par un calcul géométrique est très proche du résultat de référence. Cela confirme que l'algorithme de détermination des trajets fonctionne correctement avec 5 itérations.

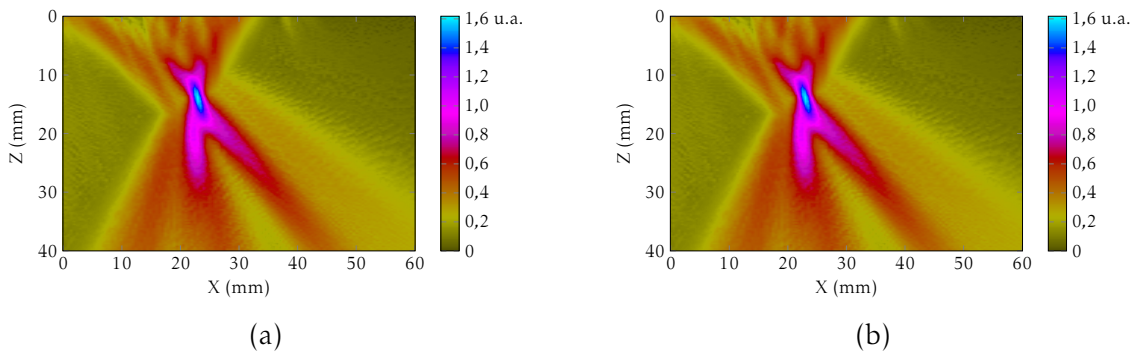


FIGURE 3.20 – Champ résultant d'une focalisation en un point en appliquant la loi de retards calculée par (a) CIVA et (b) la méthode de descente de gradient avec 5 itérations.

L'algorithme de calcul de temps de vol de CIVA n'étant pas adapté à des traitements embarqués (passage par un calcul de champ), cette section a montré qu'il pouvait être remplacé par l'algorithme itératif de descente de gradient. Celui-ci converge en quelques itérations et est implémentable dans des systèmes embarqués, tout en offrant une estimation des temps de vol très proche de la référence.

3.3 Imagerie STA adaptative dans le matériau

La méthode STA adaptative (image et mesure de la surface, calcul géométrique des trajets au travers de la surface mesurée, et image dans le matériau) a donc été évaluée

sur les trois maquettes présentées dans la section 2. La première est un bloc d'acier ferritique de 256 mm par 80 mm dont la surface représente une vague de meulage. Il contient une série de quatre trous latéraux (2 mm de diamètre) usinés sous la surface complexe, et situés à une profondeur comprise entre 20 et 50 mm par rapport à la surface plane de la pièce. Ils sont espacés de 3 mm horizontalement, et de 10 mm verticalement. La seconde maquette est en acier ferritique et représente un raccord de tuyauterie. Elle comporte une série de quatre trous latéraux (2 mm de diamètre) séparés de 10 mm verticalement et de 5 mm horizontalement. La dernière maquette est un bloc en acier inoxydable de 190 mm par 50 mm. Sa surface reproduit la géométrie d'un bourrelet de soudure. Une série de cinq trous latéraux (2 mm de diamètre) est insérée à 30 mm de profondeur avec un espacement de 25 mm. Le capteur utilisé lors de ces trois expériences est composé de 64 éléments (pas interéléments : 0,8 mm, fréquence centrale : 2 MHz).

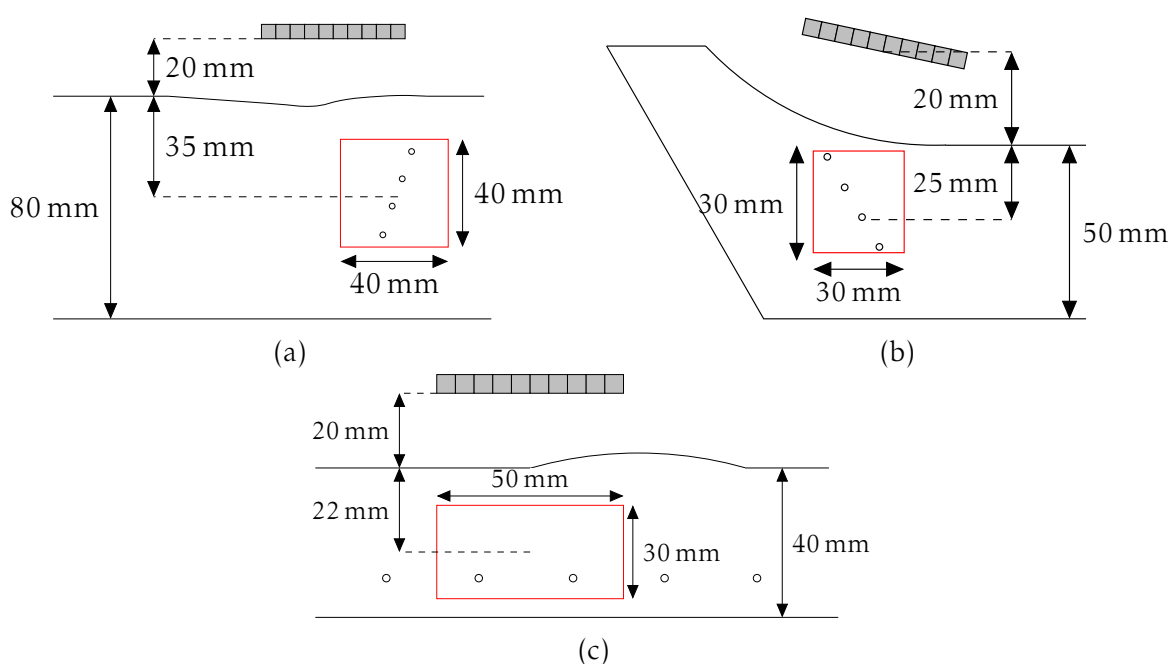


FIGURE 3.21 – Évaluation de l'imagerie STA adaptative avec trois maquettes représentant différents types de géométrie : (a) vague de meulage, (b) raccord de tuyauterie et (c) bourrelet de soudure.

Pour chaque configuration, une acquisition STA a été réalisée avec une longueur de numérisation suffisamment importante pour contenir à la fois l'écho de surface et les échos de défauts (cf. sous-section 3.1). La figure 3.22 affiche les représentations de la matrice $\mathbf{K}(t)$ pour les trois maquettes lorsqu'un seuil à -6 dB a été choisi. On note que dans le cas de la vague de meulage (cf. figure 3.22a), 68 % des signaux sont éliminés et une sous-ouverture en réception de 33 éléments est utilisée pour chaque émission avec un élément. Pour le bourrelet de soudure, ce sont 65 % des signaux $k_{ij}(t)$ qui se trouvent sous le seuil, menant à une sous-ouverture de 31 récepteurs (cf. figure 3.22c).

Finalement, 51 % des signaux sont sous le seuil pour le raccord de tuyauterie, ce qui donne une sous-ouverture de 40 récepteurs (cf. figure 3.22b).

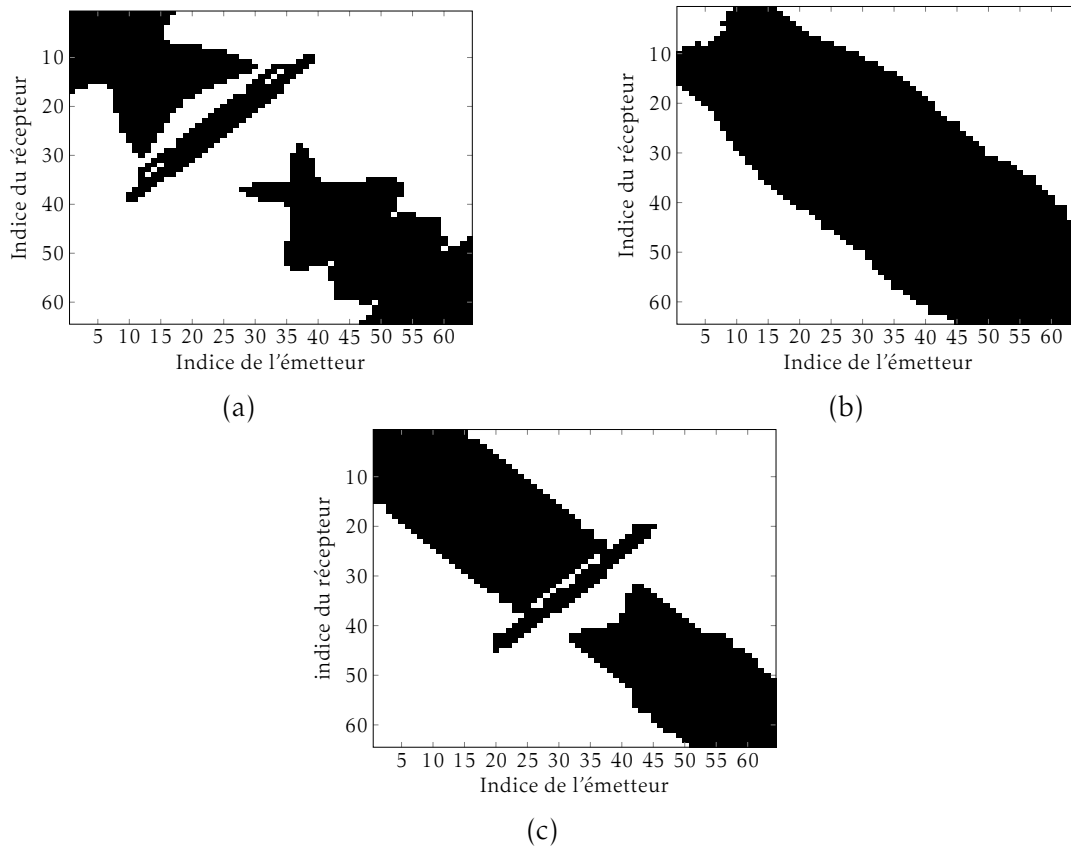


FIGURE 3.22 – Filtrage de la matrice $K(t)$ pour l'imagerie adaptative. (a) Vague de meulage, (b) raccord de tuyauterie et (c) bourrelet de soudure.

Les trajets à travers les surfaces reconstruites sont ensuite calculés à l'aide de la méthode de descente de gradient (avec 5 itérations) pour obtenir l'image dans la pièce. Pour valider les résultats de la méthode adaptative, l'image expérimentale est comparée à celle obtenue par simulation avec le logiciel CIVA. La simulation reprend la configuration de contrôle (positionnement du capteur, pièce), mais les trajets sont calculés par simulation du champ rayonné dans la pièce [55]. Les échos de défauts sont également simulés avec le modèle SOV (Separation Of Variables [56, 57]). Ainsi, on peut comparer l'image expérimentale avec l'image « optimale » obtenue par simulation. Pour la pièce représentant une vague de meulage, on constate que les échos de défauts sont plus larges sur l'image expérimentale (cf. figures 3.23a et 3.23b). Dans ce cas, l'image est décentrée par rapport à l'axe du capteur (cf. figure 3.21a) ce qui implique que certains trajets ultrasonores passent par la surface située en dehors de l'ouverture du capteur. Comme l'extension de la surface mesurée est limitée par l'ouverture D du capteur, certains trajets ne sont pas calculés par la méthode adaptative. Ce n'est pas le cas pour l'image réalisée en simulation, car la totalité de la surface est connue. On

note également du bruit dans le coin supérieur gauche de l'image. Il provient de l'écho de surface qui n'est pas pris en compte dans la simulation. Malgré ces différences, les défauts sont correctement détectés et positionnés. Pour les deux autres maquettes, les différences sont beaucoup moins marquées. Les figures 3.23c et 3.23d montrent que les images, expérimentales et simulées, réalisées sur le raccord de tuyauterie sont très proches. Comme la zone d'intérêt est située sous la surface mesurée, tous les trajets sont calculés et les échos de défauts ont la même forme. On observe des artéfacts en haut de l'image sur la figure 3.23d qui proviennent de l'écho de surface (non simulé). Les deux dernières images (cf. figures 3.23e et 3.23f) montrent que, dans le cas du bourrelet de soudure, les résultats expérimentaux et de simulations sont aussi très proches.

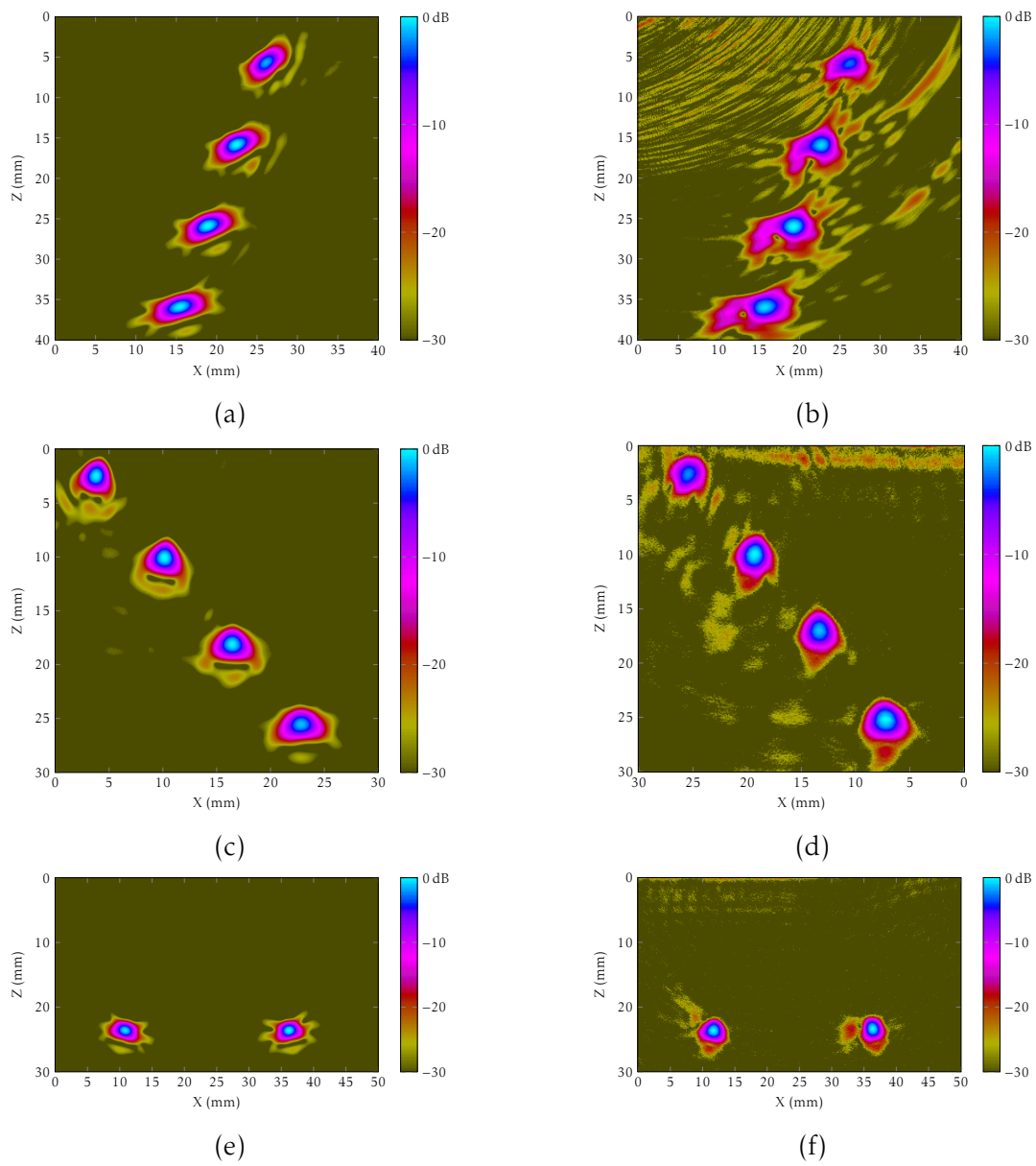


FIGURE 3.23 – Comparaison des images STA obtenues à partir de données simulées (gauche) et expérimentales (droite) sur différentes géométries de surface. (a-b) Vague de meulage, (c-d) raccord de tuyauterie et (e-f) bourette de soudure.

3.4 Imagerie adaptative temps-réel dans un appareil industriel

La méthode a été implémentée par une équipe du laboratoire dans un système ultrasonore industriel développé par la société M2M, en collaboration avec le CEA-LIST. Cet appareil, appelé Gekko, est un système ultrasonore multivoies, portable, capable de piloter des capteurs multiéléments comprenant jusqu'à 64 éléments (cf. figure 3.24a). Le système permet l'affichage d'une image STA complète d'un balayage mécanique en cumulant, en temps réel, les images de chaque position du capteur. L'image complète est construite de la même manière que celle présentée au chapitre 2 (sous-section 3.4, équation 2.28).

Comme expliqué au chapitre 1 (sous-section 2.4), le contrôle de composants en immersion présente certaines contraintes et notamment celle de devoir immerger le composant. Ceci implique de démonter la pièce et peut poser des problèmes pour certains matériaux. Pour pallier ces inconvénients, la société Imasonic a développé un nouveau capteur multiéléments permettant de réaliser des inspections en immersion dite « locale ». Pour cela, le capteur est équipé d'un sabot muni d'une membrane souple en élastomère remplie d'eau (cf. figure 3.24b).

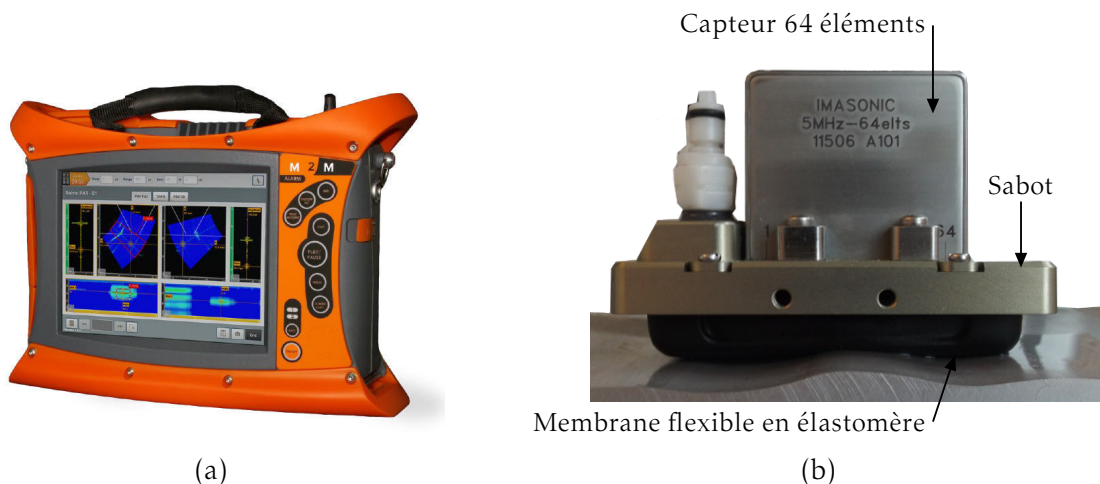


FIGURE 3.24 – Contrôle de composants complexes en immersion locale : (a) système ultrasonore multivoies Gekko, commercialisé par la société M2M et (b) capteur multiéléments muni d'un sabot souple rempli d'eau, fabriqué par la société Imasonic.

Ces deux équipements (système et sabot souple) ont été utilisés pour réaliser le contrôle d'une pièce de géométrie complexe. Celle-ci comprend deux séries de défauts artificiels identiques (quatre encoches de différentes hauteurs et un trou latéral de 2 mm de diamètre) situés sous une surface plane et sous une surface ondulée (cf. figure 3.25a). Le capteur, composé de 64 éléments émettant à 5 MHz (pas interéléments de 0,6 mm), et muni d'un sabot souple, est déplacé tout le long de la pièce pour imager les deux séries de défauts. La figure 3.25 montre les images obtenues en activant le traitement adaptatif (cf. figure 3.25b) et en le désactivant (cf. figure 3.25c). Lorsque le

traitement est désactivé, la surface de la pièce est supposée plane. Les images obtenues sous la surface plane sont identiques alors que, sous l'interface complexe, les échos de défauts ne sont pas identifiés en l'absence de traitement adaptatif. En appliquant le procédé adaptatif, les défauts sous l'interface complexe sont bien détectés et leur signature est sensiblement la même que sous l'interface plane.

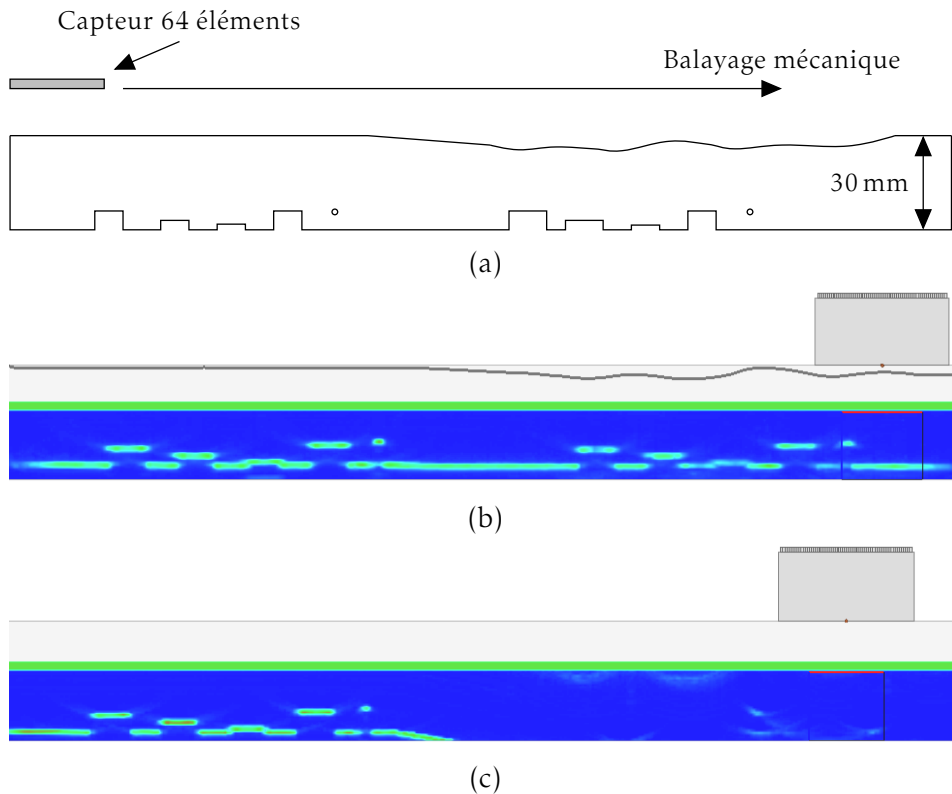


FIGURE 3.25 – Contrôle d'une pièce présentant une géométrie de surface complexe : (a) schéma de la pièce inspectée, deux séries de défauts artificiels identiques sont placées sous une surface plane et une surface complexe, (b) inspection par la méthode STA adaptative et (c) inspection par la méthode STA classique (sans prise en compte de la surface complexe).

Cette méthode temps-réel permet de réaliser le contrôle de composants avec une cadence d'imagerie de l'ordre de 10 images par seconde.

On souhaite augmenter la cadence d'imagerie. Pour cela, la méthode PWI présentée au chapitre 2 peut être une solution. En effet, on a montré que sur surface plane, elle permettait d'obtenir des images de qualité égale à celles obtenue avec la méthode STA, tout en nécessitant moins de tirs et d'opérations. Dans la suite, nous présentons donc la généralisation de la méthode PWI à des surfaces complexes et son utilisation dans une méthode adaptative.

4 Imagerie PWI adaptative

Par rapport à la précédente méthode ou la matrice $\mathbf{K}(t)$ est post-traitée deux fois pour aboutir à l'image finale, l'imagerie PWI adaptative nécessite deux acquisitions. La première correspond à l'émission d'ondes planes dans l'eau pour imager la surface et extraire sa géométrie. Dans la seconde, des ondes planes sont transmises sous la surface complexe pour former une image dans le matériau. Cette section commence par une présentation de l'algorithme de calcul de lois de retards pour la transmission d'ondes planes sous une interface complexe. Pour valider l'algorithme, des images STA et PWI sont comparées dans le cas d'un capteur à une position fixe, puis en imposant un balayage mécanique au-dessus d'une surface complexe. L'imagerie PWI adaptative est ensuite mise en œuvre et comparée à la méthode STA adaptative (nombre de tirs, de signaux à stocker et qualité d'image).

4.1 Généralisation de la méthode PWI pour des surfaces complexes

Pour que la méthode PWI soit applicable à tout type de géométrie de surface, il faut disposer d'un algorithme générique de calcul de lois de retards pour former des ondes planes sous des interfaces complexes. Pour un capteur de N éléments, la loi de retards est obtenue en calculant les N rayons partant des éléments jusqu'à une droite dans le solide représentant le front d'onde plan. Les temps de propagation associés aux N rayons sont utilisés à la fois pour le calcul de la loi de retards (acquisition) et la reconstruction de l'image PWI dans la pièce (somme cohérente des signaux en tous points).

4.1.1 Calcul des lois de retards pour une surface complexe

La première étape consiste à définir un front d'onde plan dans la pièce avec l'angle de transmission β (par rapport à l'axe z). On le définit à l'aide d'un vecteur unitaire $\mathbf{u} = (\cos\beta, \sin\beta)$, normal au front, et un point arbitraire $M_0(X_0, Z_0)$ (cf. figure 3.26a). La seconde étape consiste à déterminer les trajets ultrasonores entre les éléments du capteur et le front d'onde. Il faut donc, pour chaque point $S(X_s, Z_s)$ de la surface, calculer le trajet dans l'eau entre le capteur et la surface, puis dans la pièce, entre la surface et le front d'onde.

Dans le repère local de la surface au point $S(X_s, Z_s)$, l'angle d'incidence Φ du rayon dans l'eau est donné par :

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{v_e}{v_s} \sin(\theta + \beta)\right), \quad (3.34)$$

où θ est l'angle entre la tangente locale à la surface en $S(X_s, Z_s)$ et l'horizontale (cf. figure 3.26b). Finalement, l'angle d'incidence α dans le repère capteur s'écrit :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v_e}{v_s} \sin(\theta + \beta)\right) - \theta. \quad (3.35)$$

Une fois cet angle déterminé, on calcule l'abscisse du point d'intersection $C(x_c, 0)$ du rayon dans l'eau avec le plan du capteur :

$$x_c = X_s - Z_s \tan \alpha. \quad (3.36)$$

Pour le rayon dans la pièce, on calcule les coordonnées du point $M(x_m, z_m)$ de la manière suivante :

$$\begin{cases} x_m = \frac{X_0 \tan \beta + \frac{X_s}{\tan \beta} + Z_s - Z_0}{\tan \beta + \frac{1}{\tan \beta}} \\ z_m = (X - X_0) \tan \beta + Z_0 \end{cases}. \quad (3.37)$$

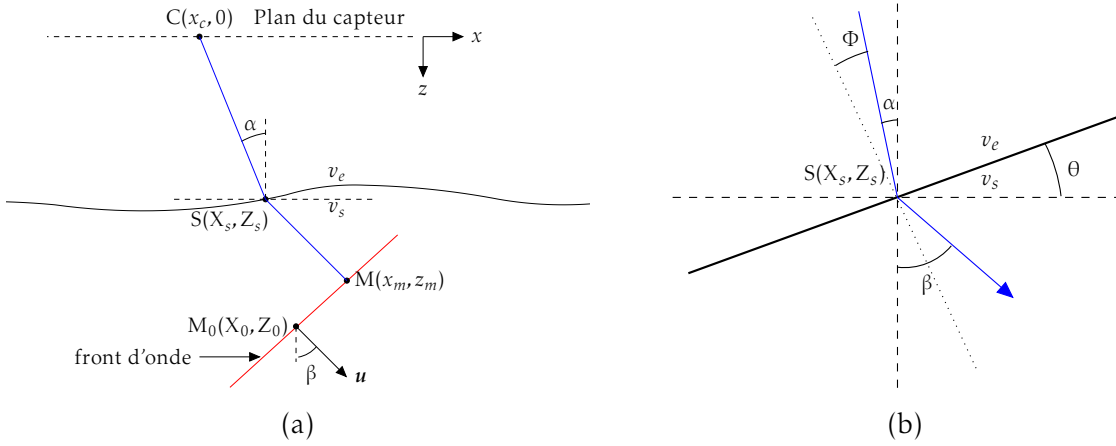


FIGURE 3.26 – Calcul d'une loi de retards : (a) rayon théorique entre un point $C(x_c, 0)$ appartenant au plan du capteur et un point $M(x_m, z_m)$ du front d'onde, en passant par le point de la surface $S(X_s, Z_s)$, et (b) angle d'incidence dans le repère local de la surface au point $S(X_s, Z_s)$.

Un trajet physique est un trajet passant par le centre d'un élément ($x_c = X_e$). Si aucun trajet ne correspond, on conserve celui le plus proche du centre et respectant le critère $X_e - a/4 \leq x_c \leq X_e + a/4$, où a est la largeur d'un élément. Une fois les N trajets déterminés, on en déduit les N temps de vol t_i^e associés ($1 \leq i \leq N$). Finalement, les retards à appliquer en acquisition sont obtenus grâce à l'équation $\tau = \max_{i=1}^N (t_i^e) - t_i^e$.

Un exemple de calcul de loi de retards est donné sur la figure 3.26. Cette loi a été déterminée pour un capteur de 64 éléments (fréquence centrale 5 MHz, pas interéléments 0,6 mm) et une profondeur moyenne de la surface $H = 20$ mm. C'est ce capteur qui sera utilisé par la suite dans les validations expérimentales. Les trajets calculés

pour engendrer une onde plane longitudinale à 45° dans la pièce en aluminium, présentée dans la sous-section 3.4, sont représentés sur la figure 3.27a et la loi de retards associée est reportée sur la figure 3.27b.

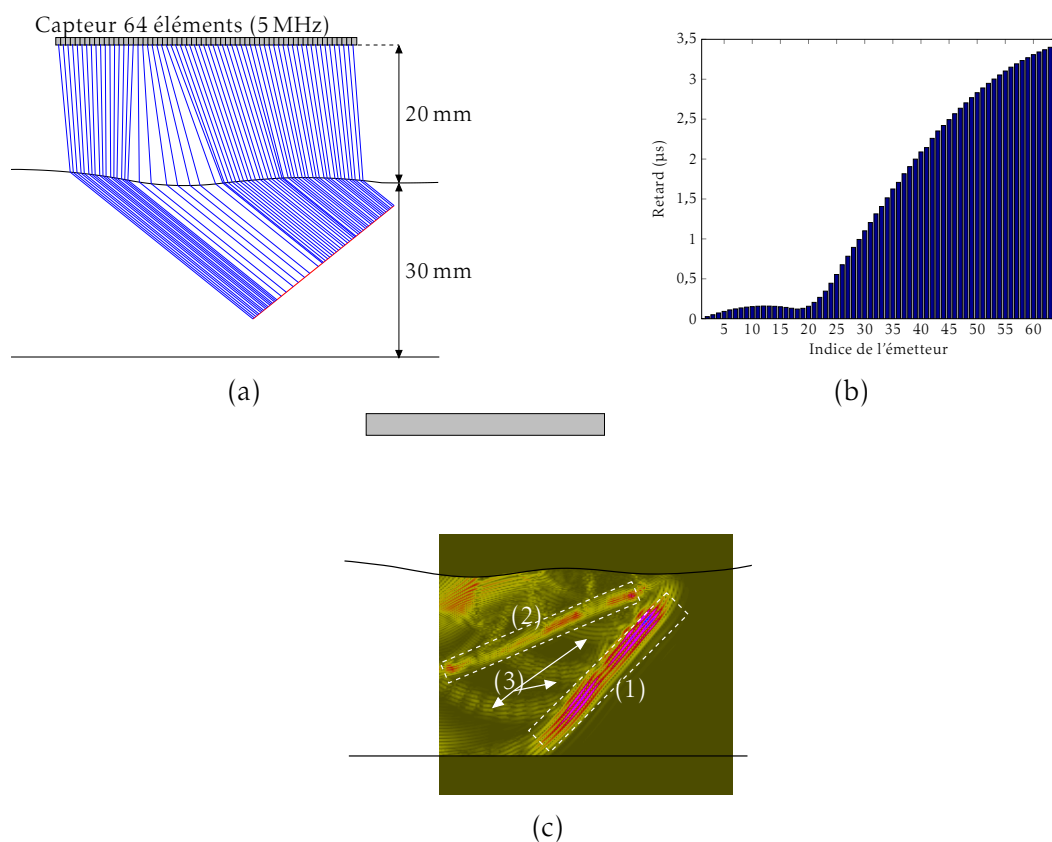


FIGURE 3.27 – Génération d'une onde plane à 45° sous la surface : (a) détermination des trajets entre les émetteurs et le front d'onde, (b) retards à appliquer en fonction de l'indice de l'élément et (c) champ simulé obtenu.

Cet algorithme a été évalué à l'aide de simulations réalisées avec le logiciel CIVA. Les lois ont été calculées dans Matlab, puis chargées dans CIVA pour réaliser un calcul de champ dans la pièce et, ainsi, vérifier qu'une onde plane était bien obtenue. La figure 3.27c présente le champ calculé pour une onde plane longitudinale transmise à 45° dans le matériau (la loi de retard est celle affichée sur la figure 3.27b). L'image confirme que l'onde L (1) transmise est bien plane sous la surface, dans le champ proche du capteur. L'onde L est suivie d'une onde plane T (2) qui est transmise autour de 23° . Des artéfacts (3), résultant de la diffraction sur les bords du capteur, sont également présents juste derrière le front d'onde (1). En pratique, ces artéfacts peuvent être corrigés si des fonctions d'apodisation sont disponibles dans l'appareil d'acquisition. En dernière remarque, on constate que l'amplitude n'est pas constante sur l'ensemble du front (1). Ceci est dû au fait que la densité de rayon n'est pas homogène (cf. figure 3.27a) le long du front d'onde.

4.1.2 Imagerie PWI sous une surface complexe connue

Pour évaluer la méthode PWI dans le cas d'une surface complexe, des expériences ont été menées avec la maquette utilisée en imagerie adaptative temps-réel (cf. figure 3.25a). Dans un premier temps, le capteur est placé à une position fixe au-dessus de la surface complexe. À cette position, la pièce comprend un trou latéral de 2 mm de diamètre situé à 6 mm du fond, ainsi qu'une encoche de 6 mm de haut et de 10 mm de large (cf. figure 3.28).

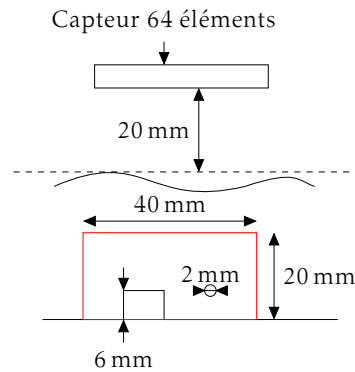


FIGURE 3.28 – Image PWI sur surface complexe connue.

Les lois de retards de l'acquisition PWI sont calculées en considérant le profil réel de la surface, renseigné par l'usineur. Une acquisition STA est également réalisée en vue de faire une comparaison. Les images obtenues sont présentées sur la figure 3.29. L'image STA (cf. figure 3.29a) est reconstruite en utilisant le profil réel et la méthode de calcul des trajets ultrasonores est celle présentée dans la sous-section 3.2. L'image PWI (cf. figure 3.29b) est obtenue en transmettant 9 ondes planes L entre -20 et 20° . On observe que les deux images sont similaires, avec une importante réduction du nombre de tirs dans la méthode PWI (5 contre 64). Ce premier résultat confirme que l'algorithme PWI fonctionne correctement pour cette surface complexe.

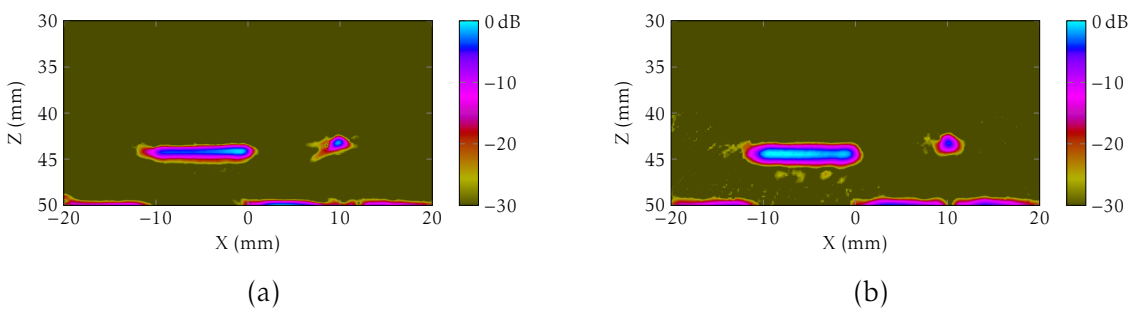


FIGURE 3.29 – Méthode PWI généralisée à des surfaces complexes : (a) image STA et (b) image PWI réalisée avec 9 tirs (-20 à 20° avec un pas de 5°).

Ces résultats ont été obtenus en une position fixe de la sonde où la surface présente une concavité. Pour valider la méthode sur différentes géométries de surface, une

acquisition a été réalisée en déplaçant le capteur au-dessus de la surface ondulée. La même acquisition a été effectuée au-dessus de la surface plane pour obtenir une image de référence. Le balayage mécanique est de 80 mm avec un pas d'acquisition de 5 mm. Pour chaque position, une acquisition PWI est réalisée en transmettant 9 ondes planes entre -20° et 20° . Les figures 3.30b et 3.30c montrent un très bon accord entre l'image de référence sous la surface plane et celle sous la surface complexe. On observe que la qualité d'image est très bonne dans les deux cas, en dépit du nombre réduit d'ondes transmises (144 au total) et un pas de balayage important (5 mm).

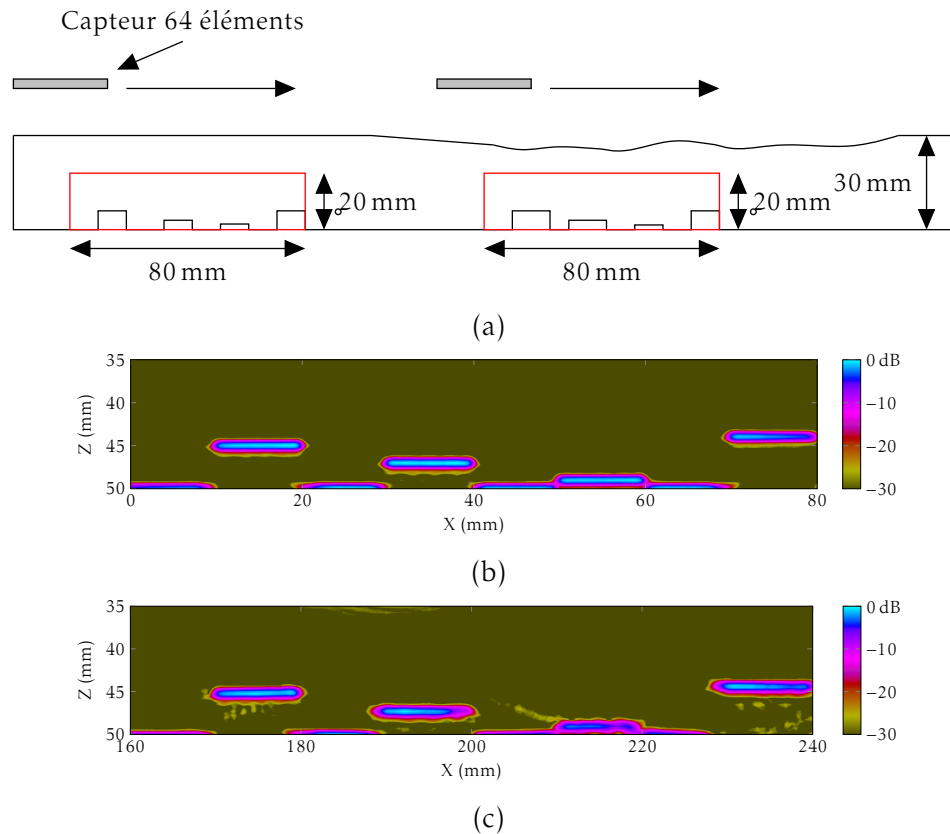


FIGURE 3.30 – Méthode PWI sous une surface complexe : (a) Balayage mécanique du capteur, image PWI (b) sous la surface plane et (c) sous la surface complexe.

4.2 Méthode PWI adaptative

On a montré que la méthode PWI donne le même résultat que l'imagerie STA pour une surface complexe, et qu'elle reste robuste quand la géométrie de surface évolue en fonction du déplacement du capteur. Il s'agit donc maintenant de montrer qu'on peut l'appliquer en mode adaptatif lorsque la surface n'est pas connue *a priori*. En première solution, on pourrait appliquer l'une des quatre méthodes de mesure de surface décrites dans la section 2. Cependant, cela impliquerait de réaliser deux

types d'acquisitions différentes pour mesurer la surface et imager les défauts. Comme PWI, la méthode SAUL repose sur une série de tirs où tous les éléments sont actifs à chaque émission, mais on a montré (cf. sous-section 2.2) que la mesure de surface par la méthode SAUL n'est pas la plus précise. L'idée qui est donc proposée ici est de reconstruire la surface en émettant des ondes planes dans l'eau pour constituer une image de la surface et d'en extraire la géométrie de manière analogue à la méthode STA.

4.2.1 Mesure de la surface par la méthode PWI

Le principe de mesure de surface par la méthode PWI est le même que dans la méthode STA (cf. sous-section 2.1.4). Il s'agit de réaliser une image PWI de la surface en supposant un milieu composé uniquement d'eau et d'extraire le profil de la surface à partir de cette image. Les figures 3.31a et 3.31b présentent les résultats obtenus avec les méthodes STA glissante et PWI ($n_x = 241$, $n'_x = 90$, $n_z = 186$ et $n = 31$). L'image PWI est réalisée en transmettant des ondes entre -10° et 10° avec un pas de 1° (21 ondes planes). On observe que les deux images sont similaires, avec une réduction du nombre de transmissions par un facteur 3 pour la méthode PWI. Il est à noter que l'image PWI, sans pondération, est moins bruitée que la méthode STA optimisée à l'aide d'une fenêtre glissante et d'une pondération des signaux en émission/réception. On obtient donc une image de meilleure qualité avec un algorithme plus simple.

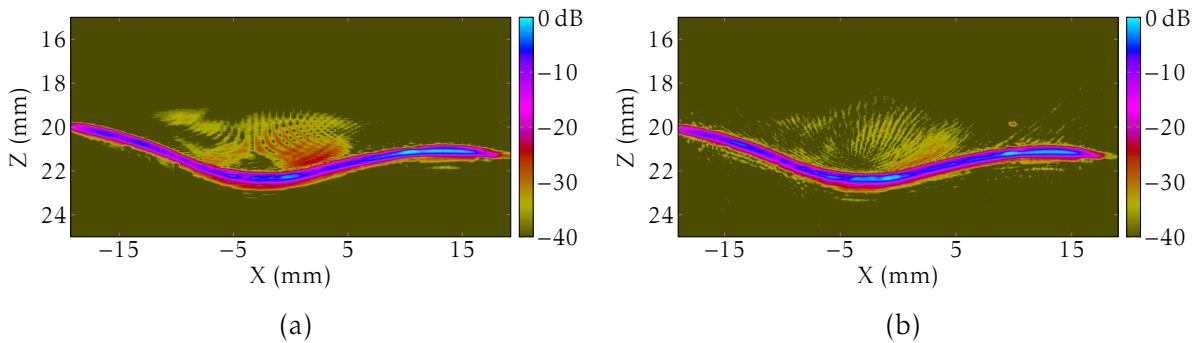


FIGURE 3.31 – Reconstruction de surface par la méthode PWI : image réalisée avec la méthode (a) STA glissante et (b) PWI (-10° à 10° , pas 1°).

Le tableau 3.3 affiche pour les deux méthodes le nombre de tirs (rapidité d'acquisition) et le nombre de signaux à stocker (contrainte mémoire) pour obtenir les images de la surface. Il montre qu'il y a sensiblement moins de tirs à réaliser et moins de signaux à stocker avec la méthode PWI qu'avec la méthode STA.

	Nombre de tirs	Nombre de signaux à stocker
STA	64	4096
PWI	20	1280

TABLE 3.3 – Récapitulatif des grandeurs caractéristiques des méthodes de mesure de surface STA glissante et PWI : nombre de tirs et de signaux à stocker.

4.2.2 Imagerie PWI adaptative dans la structure

Une fois la surface mesurée, il faut calculer les lois de retards pour former l'image finale dans la pièce. Pour cela, on procède de la manière décrite en 4.1.1. Cependant, comme la surface reconstruite est de taille inférieure ou égale à l'ouverture du capteur, il n'est pas toujours possible de calculer un retard pour tous les éléments (car le trajet ne passe pas par un point de la surface mesurée par exemple). Pour tous les angles, on relève quels éléments ne sont pas associés à un trajet et on réduit l'ouverture du capteur aux éléments qui sont toujours associés à un trajet ultrasonore. Ainsi, dans la configuration décrite sur la figure 3.28, l'ouverture active est de 47 éléments. L'image dans la pièce est réalisée en calculant, pour cette ouverture active, les lois de retards nécessaires à l'émission de 41 ondes planes comprises entre -20° à 20° (pas de 1°). L'image a pour dimensions $30 \times 20 \text{ mm}^2$. L'image obtenue avec la méthode PWI est présentée sur la figure 3.32b et comparées à celle réalisée avec la méthode STA adaptative (cf. figure 3.32a). On constate que les deux images sont très proches avec des nombres de transmissions équivalents (PWI : 62, STA : 64), ce qui confirme que la méthode PWI adaptative fonctionne correctement.

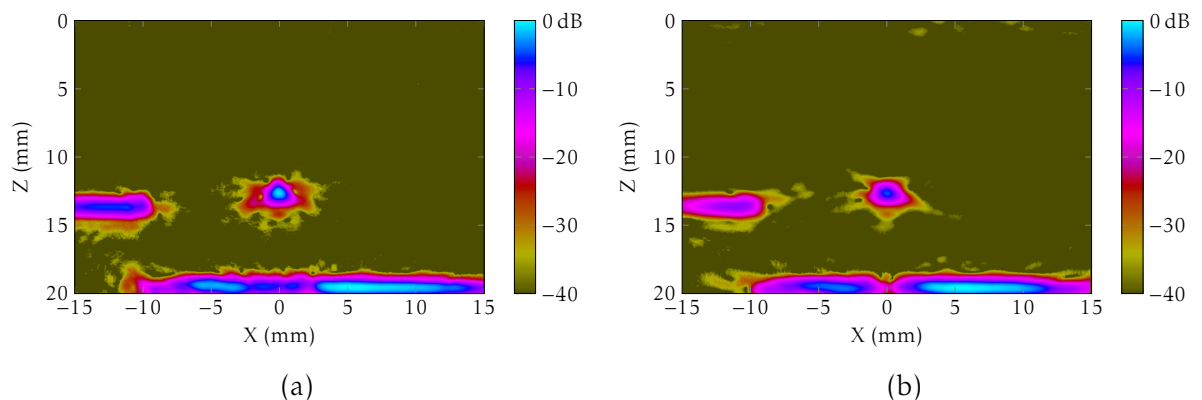


FIGURE 3.32 – Image PWI adaptative : image obtenue avec (a) la méthode STA adaptative et (b) la méthode PWI adaptative.

5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, deux méthodes d'imagerie adaptative ont été présentées. La première est basée sur l'acquisition STA. Une première image est réalisée pour mesurer la surface. Pour cette étape, la méthode STA a été optimisée en appliquant un principe de fenêtre glissante pour réduire le bruit dans l'image ainsi que le temps de calcul. Une seconde image est produite ensuite dans la pièce avec la méthode STA classique et en calculant les trajets ultrasonores à travers la surface mesurée, à l'aide d'un algorithme itératif (méthode de descente de gradient). La méthode STA adaptative a été validée sur plusieurs maquettes présentant différentes géométries de surface. Ces tests ont montré un très bon accord entre les images expérimentales et celles de référence obtenues par simulation. Elle a été implémentée dans un système industriel fabriqué par la société M2M et permet de réaliser l'inspection de composants complexes en temps réel.

La seconde méthode est basée sur la transmission d'ondes planes. Une première transmission permet de réaliser une image PWI et d'en extraire la géométrie de la surface. On peut ensuite calculer un jeu de lois de retards pour engendrer des ondes planes sous la surface complexe et appliquer une nouvelle fois l'algorithme PWI pour réaliser une image dans la pièce. Cette méthode a été validée expérimentalement sur une pièce présentant une surface complexe et a montré un bon accord avec l'image obtenue avec la méthode STA glissante.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Cette thèse avait pour objectif de proposer et développer des méthodes d'imagerie adaptative implémentables dans des systèmes industriels temps-réel. L'utilisation de telles méthodes permet de simplifier le contrôle de composants complexes, ce qui se traduit par une réduction des temps de contrôle et donc des coûts de contrôle.

Dans un premier temps, une nouvelle méthode a été proposée pour pallier certains défauts de l'imagerie STA. En particulier, on a cherché à diminuer le nombre de tirs nécessaires à la collecte des données, le volume de données à stocker ainsi que les artefacts caractéristiques de l'imagerie STA. Pour cela, la méthode PWI, inventée dans le domaine de l'imagerie médicale, a été adaptée aux contraintes du CND. Le principe de transmission d'ondes planes a été adopté et l'algorithme d'imagerie a été modifié pour proposer les mêmes possibilités que celles offertes par la méthode STA (résolution optimale, modes de propagation). Les algorithmes des méthodes STA et PWI ont été détaillés dans le cas d'un contrôle en immersion, sur des pièces planes. La mise en œuvre expérimentale de ces méthodes a démontré qu'en mode direct, dans des matériaux homogènes et peu atténuants, la méthode PWI fournit des images de qualité équivalente à la méthode STA tout en nécessitant moins de transmissions. On a notamment montré que le RSB maximal était conservé avec une réduction d'un facteur trois du nombre de transmissions à réaliser. Une diminution du nombre de tirs d'un facteur dix est même envisageable si l'on tolère une dégradation sensible du RSB. Testée sur un matériau présentant une forte atténuation visco-élastique, la méthode PWI a permis de détecter des défauts non décelables sur les images STA. Cela peut se révéler intéressant pour le contrôle de tubes en polyéthylène, matériau de plus en plus couramment utilisé pour le transport de fluides industriels (pétrole, gaz...). Les méthodes STA et PWI ont également été employées avec le mode de propagation demi-bond. Ce mode améliore de manière significative la caractérisation de fissures en les imageant sur toute leur longueur. C'est dans ce mode que la méthode PWI apporte le plus d'amélioration par rapport à STA. Les validations expérimentales ont montré que la méthode PWI réduit fortement les artefacts d'imagerie qui peuvent perturber la caractérisation des défauts. De plus, dans certaines configurations, un défaut de type fissure peut être imagé à l'aide d'une unique onde plane. Enfin, il a été montré que l'association d'un balayage mécanique avec la méthode PWI permet, en très peu de tirs et en combinant les modes de propagation direct et demi-bond, d'imager entièrement les faces horizontales et verticales d'encoches situées en fond de pièce.

Dans un second temps, deux méthodes adaptatives, basées sur les algorithmes STA et PWI, ont été proposées. Le principe général d'une méthode adaptative est de mesurer la surface sous le capteur, puis de s'adapter à cette surface pour réaliser une image dans la pièce. Quatre méthodes de mesure de surface, ont été présentées et comparées. Il s'agit des méthodes Pulse-Écho, Pitch-Catch, SAUL et STA. La mesure de surface par imagerie STA s'est révélée être la méthode donnant le plus satisfaction. Une méthode de calcul des trajets ultrasonores à travers une interface complexe a été présentée et permet de calculer l'image dans la pièce. La méthode STA adaptative, optimisée pour réduire les temps de calcul, couple les méthodes de mesure de surface et de calcul des trajets à partir d'une unique acquisition STA, donnant ainsi une image sous une surface complexe. La méthode PWI adaptative a également été présentée. Dans cette méthode, la surface est mesurée en réalisant une image PWI de la surface. Un algorithme donne ensuite le jeu de lois de retards à appliquer pour engendrer des ondes planes sous une surface complexe. Associé à la mesure de surface par PWI, cet algorithme permet la réalisation d'images sous une surface complexe sans connaissance *a priori* de sa géométrie. Les études expérimentales menées avec ces deux méthodes adaptatives ont donné des résultats équivalents et très proches de ceux obtenus avec la connaissance de la position du capteur et de la géométrie de la pièce. De plus, la méthode STA adaptative a été implémentée dans un système industriel permettant le contrôle de composants complexes avec une cadence de l'ordre de 10 images par seconde.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Au début de la thèse, la méthode STA était déjà implémentée dans certains appareils industriels. Cependant, seul le contrôle d'une pièce plane à l'aide d'un capteur au contact était possible. À la fin de cette thèse, la méthode est maintenant applicable à des pièces complexes en utilisant le mode de propagation direct. Or, on a vu dans ce mémoire, que l'utilisation de modes de propagation plus complexes améliore la détection de certains types de défauts. Il serait donc intéressant d'étendre la méthode STA adaptative à ces modes complexes, en particulier au mode demi-bond.

Une autre perspective est le portage de la méthode PWI adaptative sur un système industriel temps-réel. La méthode PWI a été développée et validée en traitant les données d'acquisition dans Matlab. Ces tests ont montré que la méthode réduit sensiblement les temps de calcul tout en conservant la qualité des images. L'implémentation dans un système industriel devrait augmenter les cadences d'imagerie et réduire les temps et coûts de contrôle.

Enfin, une perspective à plus long terme est la généralisation de ces méthodes adaptatives aux capteurs matriciels, pour réaliser de l'imagerie 3D. Par exemple, la méthode PWI 3D en temps-réel développée dans le domaine médical permet de réaliser des cartographies de vaisseaux sanguins *in vivo* [58]. La méthode PWI 3D serait applicable aux contrôles au contact, en mode direct, et nécessiterait donc une adaptation au contexte du CND, comme ce qui a été fait avec la méthode PWI 2D.

Bibliographie

- [1] D. ROYER, E. DIEULESAINT et P.-G. d. GENNES, *Ondes élastiques dans les solides. tome 1. , propagation libre et guidée*, Enseignement de la physique (Masson, 1996) (cf. p. 7, 8).
- [2] B. A. AULD, *Acoustic fields and waves in solids* (R. E. Krieger, Malabar (Fla.), 1990) (cf. p. 8).
- [3] J. ACHENBACH, H. LAUWERIER et W. KOITER, *Wave propagation in elastic solids*, North-Holland series in applied mathematics and mechanics (Elsevier Science, 1973) (cf. p. 9).
- [4] R. L. RODERICK et R. TRUELL, « The measurement of ultrasonic attenuation in solids by the pulse technique and some results in steel », [Journal of Applied Physics](#) **23**, 267–279 (1952) (cf. p. 10).
- [5] A. VIVES, *Piezoelectric transducers and applications* (Springer Berlin Heidelberg, 2008) (cf. p. 11).
- [6] J. CURIE et P. CURIE, « Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées », in [Bulletin de la société minéralogique de france](#), t. 3 (1880), p. 90–93 (cf. p. 12).
- [7] O. CASULA, C. POIDEVIN, G. CATTIAUX et P. DUMAS, « Control of complex components with smart flexible phased arrays », [Ultrasonics](#) **44**, **Supplement**, [Proceedings of Ultrasonics International \(UI'05\) and World Congress on Ultrasonics \(WCU\)](#), e647–e651 (2006) (cf. p. 13).
- [8] G. TOULLELAN et O. CASULA, « Complex geometries inspection using flexible phased-array transducers », in [7th international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components](#) (2009) (cf. p. 13).
- [9] B. DELANNOY, H. LASOTA, C. BRUNEEL, R. TORGUET et E. BRIDOUX, « The infinite planar baffles problem in acoustic radiation and its experimental verification », [Journal of Applied Physics](#) **50**, 5189–5195 (1979) (cf. p. 15).
- [10] A. SELFRIDGE, G. S. KINO et B. KHURI-YAKUB, « A theory for the radiation pattern of a narrow strip acoustic transducer », [Applied Physics Letters](#) **37**, 35–36 (1980) (cf. p. 17).
- [11] G. F. MILLER et H. PURSEY, « The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid », in [Proc. R. Soc. Lond. A](#), t. A223, sous la dir. de T. R. SOCIETY (20 mai 1954), p. 521–541 (cf. p. 17, 18).

- [12] E. A. GINZEL, A. EKHLAS, M. MATHESON, P. CYR et B. BROWN, « Near field length compensation options », [NDT.net](#) **19** (2014) (cf. p. 20).
- [13] J. HUNT, M. ARDITI et F. FOSTER, « Ultrasound transducers for pulse-echo medical imaging », [IEEE Transactions on Biomedical Engineering](#) **BME-30**, 453–481 (1983) (cf. p. 22).
- [14] E. A. GINZEL, « Near field and focusing considerations with wedges », [NDT.net](#) (2009) (cf. p. 23).
- [15] M. SPIEGEL, *Mathematical handbook of formulas and tables*, Schaum's outline series (McGraw-Hill, 1968) (cf. p. 24).
- [16] I. KOMURA, T. HIRASAWA, S. NAGAI, J.-i. TAKABAYASHI et K. NARUSE, « Crack detection and sizing technique by ultrasonic and electromagnetic methods », [Nuclear Engineering and Design](#) **206**, 351–362 (2001) (cf. p. 25).
- [17] A. LAMARRE et F. MAINGUY, « Dynamic focusing of phased arrays for nondestructive testing : characterization and application », [NDT.net](#) **4** (1999) (cf. p. 28).
- [18] S. MAHAUT, O. ROY, C. BERONI et B. ROTTER, « Development of phased array techniques to improve characterization of defect located in a component of complex geometry », [Ultrasonics](#) **40**, 165–169 (2002) (cf. p. 29).
- [19] M. KARAMAN, P.-C. LI et M. O'DONNELL, « Synthetic aperture imaging for small scale systems », [IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control](#) **42**, 429–442 (1995) (cf. p. 31).
- [20] R. CHIAO, L. THOMAS et S. SILVERSTEIN, « Sparse array imaging with spatially-encoded transmits », in [IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings](#), t. 2 (oct. 1997), 1679–1682 vol.2 (cf. p. 31).
- [21] C. HOLMES, B. W. DRINKWATER et P. D. WILCOX, « Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation », [NDT & E International](#) **38**, 701–711 (2005) (cf. p. 31).
- [22] A. FIDAHOUSSEN, P. CALMON, M. LAMBERT, S. PAILLARD et S. CHATILLON, « Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data », in [AIP Conference Proceedings](#) (avr. 2009), p. 847–854 (cf. p. 31, 32, 34, 63).
- [23] C. PRADA, S. MANNEVILLE, D. SPOLIANSKY et M. FINK, « Decomposition of the time reversal operator : detection and selective focusing on two scatterers », [Journal of the Acoustical Society of America](#) **99**, 2067–2076 (1996) (cf. p. 31).
- [24] C. FRAZIER et J. O'BRIEN, W.D., « Synthetic aperture imaging with a virtual source element », in [IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings](#), t. 2 (nov. 1996), 1555–1558 vol.2 (cf. p. 31).
- [25] N. PORTZGEN, D. GISOLF et G. BLACQUIERE, « Inverse wave field extrapolation : a different NDI approach to imaging defects », [IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control](#) **54**, 118–127 (2007) (cf. p. 32).

- [26] J. ZHANG, B. W. DRINKWATER, P. D. WILCOX et A. J. HUNTER, « Defect detection using ultrasonic arrays : the multi-mode total focusing method », *NDT & E International* **43**, 123–133 (2010) (cf. p. 32).
- [27] E. IAKOVLEVA, S. CHATILLON, P. BREDIF et S. MAHAUT, « Multi-mode tfm imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models », in *AIP Conference Proceedings*, t. 1581, 1 (21–26 juil. 2013), p. 72–79 (cf. p. 32, 34).
- [28] G. LOCKWOOD, P.-C. LI, M. O'DONNELL et F. FOSTER, « Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **43**, 7–14 (1996) (cf. p. 34).
- [29] S. HOLM, B. ELGETUN et G. DAHL, « Properties of the beam pattern of weight- and layout-optimized sparse arrays », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **44**, 983–991 (1997) (cf. p. 34).
- [30] L. MOREAU, B. DRINKWATER et P. WILCOX, « Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **56**, 1932–1944 (2009) (cf. p. 34).
- [31] S. BANNOUF, S. ROBERT, O. CASULA et C. PRADA, « Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources », *Journal of Physics: Conference Series* **457**, 012007 (2013) (cf. p. 34).
- [32] G. MONTALDO, M. TANTER, J. BERCOFF, N. BENECH et M. FINK, « Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **56**, 489–506 (2009) (cf. p. 35, 42–44, 56).
- [33] A. AUSTENG, C. NILSEN, A. JENSEN, S. NASHOLM et S. HOLM, « Coherent plane-wave compounding and minimum variance beamforming », in *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings* (oct. 2011), p. 2448–2451 (cf. p. 35, 42).
- [34] D. GARCIA, L. TARNEC, S. MUTH, E. MONTAGNON, J. POREÉ et G. CLOUTIER, « Stolt's f-k migration for plane wave ultrasound imaging », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **60**, 1853–1867 (2013) (cf. p. 35, 42).
- [35] L. LE JEUNE, S. ROBERT, E. LOPEZ VILLAYERDE et C. PRADA, « Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing : generalization to multimodal imaging », *Ultrasonics* **64**, 128–138 (2016) (cf. p. 37).
- [36] P. M. MORSE et H. FESHBACH, *Methods of theoretical physics, part i* (McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1953) (cf. p. 39).
- [37] G. B. ARFKEN et H. J. WEBER, *Mathematical methods for physicists, 6th edition* (Aca, 2005) (cf. p. 39).
- [38] P. CIARLET et J. LIONS, *Handbook of numerical analysis : numerical methods for fluids (pt. 3)*, *Handbook of Numerical Analysis* (North-Holland, 1990) (cf. p. 41).

- [39] L. SANDRIN, S. CATHELIN, M. TANTER, X. HENNEQUIN et M. FINK, « Time-resolved pulsed elastography with ultrafast ultrasonic imaging », [Ultrasonic Imaging](#) **21**, 259–272 (1999) (cf. p. 42).
- [40] A. NOWICKI et B. GAMBIN, « Ultrasonic synthetic apertures : review », [Archives of Acoustics](#) **39** (2014) (cf. p. 48).
- [41] L. MŽEIKĀ, R. ŠLITERIS et VLADIŠAUSKAS, « Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal wave in the polyethylene samples », [Ultragarasas \(Ultrasound\)](#) **65**, 12–15 (2010) (cf. p. 57).
- [42] L. LE JEUNE, S. ROBERT, P. DUMAS, A. MEMBRE et C. PRADA, « Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water », in [AIP Conference Proceedings QNDE2014](#), t. 1650, 1 (2015), p. 1037–1046 (cf. p. 75).
- [43] L. LE JEUNE, S. ROBERT, E. LOPEZ VILLAVARDE et C. PRADA, « Multimodal plane wave imaging for non-destructive testing », in [Physics procedia](#), t. 70, Proceedings of the 2015 ICU International Congress on Ultrasonics, Metz, France (2015), p. 570–573 (cf. p. 75).
- [44] L. LE JEUNE, ROBERT et C. PRADA, « Plane wave imaging for ultrasonic inspection of irregular structures with high frame-rates », in [AIP Conference Proceedings QNDE2015](#), t. To be published (2016) (cf. p. 75).
- [45] D. I. A. LINES, J. WHARRIE et J. HOTTENROTH, « Real-time full matrix capture + total focusing and other novel imaging options using general purpose pc-based array instrumentation », [Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring](#) **54**, 86–90 (2012) (cf. p. 75).
- [46] M. SUTCLIFFE, M. WESTON, B. DUTTON, P. CHARLTON et K. DONNE, « Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware », [NDT & E International](#) **51**, 16–23 (2012) (cf. p. 75).
- [47] J. CAMACHO, J. CRUZA, J. BRIZUELA et C. FRITSCH, « Automatic dynamic depth focusing for NDT », [IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control](#) **61**, 673–684 (2014) (cf. p. 75).
- [48] S. ROBERT, P. CALMON, M. CALVO, L. LE JEUNE et E. IAKOVLEVA, « Surface estimation methods with phased-arrays for adaptive ultrasonic imaging in complex components », [AIP Conference Proceedings](#) **1650**, 1657–1666 (2015) (cf. p. 76, 78).
- [49] T. SAKAMOTO et T. SATO, « A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform », [IEICE Transactions on Communications](#) **E87-B**, 1357–1365 (2004) (cf. p. 77).
- [50] B. BARSHAN et D. BASKENT, « Comparison of two methods of surface profile extraction from multiple ultrasonic range measurements », [Measurement Science and Technology](#) **11**, 833–844 (2000) (cf. p. 78).

- [51] S. ROBERT, O. CASULA, O. ROY et G. NEAU, « Real-time nondestructive testing of composite aeronautical structures with a self-adaptive ultrasonic technique », [Measurement Science and Technology](#) **24**, 074011 (2013) (cf. p. 82).
- [52] S. BANNOUF, « Développement et optimisation de méthodes d'imagerie synthétique pour le contrôle non-destructif par ultrasons de composants industriels complexes », thèse de doct. (Paris 7 Denis Diderot, 2013) (cf. p. 84).
- [53] M. J. CROCKER, *Handbook of acoustics*, A Wiley-Interscience Publication (Wiley, 1998) (cf. p. 84).
- [54] D. J. DUXBURY, J. D. RUSSELL et M. J. S. LOWE, « Accurate two-dimensional modelling of piezo-composite array transducer elements », English, [NDT & E International](#) **56**, 17–27 (2013) (cf. p. 84).
- [55] P. CALMON, A. LHEMERY et L. PARADIS, « Modeling of ultrasonic fields and their interaction with defects », in [IEEE Ultrasonics Symposium](#), t. 1 (1998), p. 779–783 (cf. p. 96, 99).
- [56] R. BRIND, J. ACHENBACH et J. GUBERNATIS, « High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities », [Wave Motion](#) **6**, 41–60 (1984) (cf. p. 99).
- [57] M. DARMON, N. LEYMARIE, S. CHATILLON et S. MAHAUT, « Modelling of scattering of ultrasounds by flaws for ndt », English, in [Ultrasonic wave propagation in non homogeneous media](#), t. 128, sous la dir. d'A. LEGER et M. DESCHAMPS, Springer Proceedings in Physics (Springer Berlin Heidelberg, 2009), p. 61–71 (cf. p. 99).
- [58] J. PROVOST, C. PAPADACCI, C. DEMENE, J.-L. GENNISSON, M. TANTER et M. PERNOT, « 3-d ultrafast doppler imaging applied to the noninvasive mapping of blood vessels in vivo », [IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control](#) **62**, 1467–1472 (2015) (cf. p. 114).

Résumé

Cette thèse, réalisée dans le cadre du contrôle non-destructif par ultrasons, propose deux nouvelles méthodes adaptatives visant à imager en temps réel des structures de surfaces complexes et irrégulières. Ces méthodes ont été développées pour les contrôles en immersion (sans contact) où l'eau assure la transmission des ultrasons dans le solide. Le principe général de l'imagerie adaptative par ultrasons est de mesurer acoustiquement la surface située sous le capteur, puis de déterminer les trajets ultrasonores à travers la surface mesurée pour réaliser une image dans le matériau. Une des méthodes pouvant être appliquée en mode adaptatif est la méthode Synthetic Transmit Aperture (STA). Elle fournit des images de grande qualité et offre la possibilité d'utiliser différents modes de reconstruction pour améliorer la caractérisation des défauts, en fonction de leur géométrie et de leur orientation. Cependant, elle présente deux inconvénients majeurs : un grand volume de données à stocker et à traiter pour calculer une image, et une plus grande sensibilité au bruit électronique ou de structure que les méthodes échographiques conventionnelles. Pour pallier ces inconvénients, la méthode Plane Wave Imaging (PWI), basée sur l'émission d'ondes planes, est proposée. Les résultats obtenus pour des surfaces planes montrent que les deux méthodes fournissent des résultats comparables en termes de résolution spatiale mais l'imagerie par émission d'ondes planes est plus robuste en présence de bruit incohérent. Ils montrent aussi que la méthode PWI améliore nettement la qualité des images dans le cas de fissures, et qu'un très faible nombre de transmissions est nécessaire par rapport à la méthode STA. Les méthodes STA et PWI ont ensuite été généralisées pour traiter le cas d'une surface complexe, et couplées à des méthodes de mesure de surface pour réaliser de l'imagerie adaptative. Les deux méthodes donnent les mêmes images que celles obtenues lorsque tous les paramètres de contrôle sont connus et la méthode PWI adaptative conserve les avantages présentés précédemment : faible sensibilité au bruit et nombre réduit de transmissions.

Mots Clefs : ultrasons, capteurs multiéléments, contrôle non-destructif, imagerie adaptative.

Abstract

This thesis, made in the non-destructive testing field, presents two new adaptive methods, looking for real-time imaging of structures with complex and irregular surfaces. These methods have been developed for immersion testing (contactless) where water ensure the transmission of the ultrasonic waves in the solid. The general principle of adaptive imaging is to acoustically measure the surface under the probe, then to determine the ultrasonic paths through the complex surface to produce an image inside the material. One of the methods that can be applied to adaptive imaging is the Synthetic Transmit Aperture (STA) method. It provides high quality images and offers the possibility of using different reconstruction modes to improve the defect characterization, depending on their geometry and orientation. However, it suffers from two major drawbacks: a large amount of data to be stored and processed, and a higher sensibility to random or structural noise than the conventional imaging methods. To overcome these drawbacks, we propose the Plane Wave Imaging (PWI) method, based on plane wave transmissions. The results on a plane surface show that the two methods give similar results in terms of spatial resolution, but PWI is less sensitive to random noise. They also reveal that PWI improves greatly image quality when defects are cracks, and that very few transmissions are needed compared to STA. The STA and PWI methods are then generalized to complex surfaces, and coupled with surface measurement methods to perform adaptive imaging. The two methods give the same images that those obtained when all the control parameters are known and the adaptive PWI keeps the advantages introduced previously: low sensibility to random noise and reduced number of transmission.

Keywords: ultrasound, array probe, non destructive-testing, adaptive imaging.